

— 平成 28 年度 修士論文 —

実環境下における携帯電話基地局および
第 3 世代携帯電話端末からの電波による脳
へのばく露の検討

首都大学東京大学院 理工学研究科

電気電子工学専攻

15882322 新沼 友望

指導教員 多氣 昌生 教授

目次

1	序論	4
1.1	研究背景	4
1.2	本論文の目的	5
1.3	本論文の構成	5
2	実環境下における基地局からの電界強度および端末からの送信電力	7
2.1	はじめに	7
2.2	測定方法	7
2.3	屋内外における検討	8
2.3.1	移動ルートと測定対象とする場所	8
2.3.2	各場所における基地局からの電界強度および端末からの送信電力	10
2.4	定点における測定	13
2.4.1	定点における 24 時間測定	13
2.4.2	測定日による基地局からの電界強度の差	16
2.4.3	音声の有無による端末からの送信電力の差	16
2.5	東京都内移動時における検討	18
2.5.1	走行ルート	18
2.5.2	基地局からの電界強度および端末からの送信電力	20
2.5.3	文献値との比較	23
2.5.4	地域ごとにおける基地局からの電界強度および端末からの送信電力の平均値	25
2.6	まとめ	29
3	脳のばく露量推定の為の方法とモデル	30
3.1	はじめに	30
3.2	ばく露量の指標	30
3.3	SAR を求めるためのモデルと条件	31
3.3.1	基地局による SAR を求めるためのモデルと条件	31

3.3.2 端末による SAR を求めるためのモデルと条件	34
3.4 まとめ	36
4 基地局および端末による脳の SAR	38
4.1 はじめに	38
4.2 ある実環境下における基地局および端末による脳の SAR	38
4.2.1 屋内外を含めた各場所における基地局および端末による SAR	38
4.2.2 各地域における基地局および端末による SAR	40
4.3 まとめ	42
5 結論	43
参 考 文 献	45
A 全身および頭部モデルに対する平面波ばく露による脳の SAR の検討	48
A.1 はじめに	48
A.2 検討方法	48
A.2.1 検討に用いる人体モデル	48
A.3 頭部および肩モデルと全身モデルとの SAR の相対差	50
A.4 まとめ	52
B 小児モデルを用いた場合との比較	53
B.1 はじめに	53
B.2 モデルと条件	53
B.2.1 基地局による SAR を求めるためのモデルと条件	53
B.2.2 端末による SAR を求めるためのモデルと条件	56
B.3 成人モデルとの比較	57
B.4 まとめ	58
謝辞	59
本研究に関する研究業績	61

目 次

2.1	測定風景 (屋内外における検討)	9
2.2	移動ルートと測定場所	9
2.3	移動に応じた基地局からの電界強度の 6 分間の移動平均値	11
2.4	移動に応じた端末からの送信電力	11
2.5	各場所における基地局からの電界強度	12
2.6	各場所における端末からの送信電力	12
2.7	9 号館 5 階実験室概略	13
2.8	測定風景 (定点における 24 時間測定)	14
2.9	基地局からの電界強度の 6 分間の移動平均値における 24 時間の推移	15
2.10	端末からの送信電力における 24 時間の推移	15
2.11	基地局からの電界強度の 6 分間の移動平均値における測定日による違い	16
2.12	測定風景 (音声の有無における検討)	17
2.13	端末からの送信電力	18
2.14	測定風景 (東京都内移動時における測定)	19
2.15	走行ルート	19
2.16	測定 1(郊外を多く走行) における基地局からの電界強度の 6 分間の移動平均値	21
2.17	測定 2(市街を多く走行) における基地局からの電界強度の 6 分間の移動平均値	21
2.18	測定 1(郊外を多く走行) における端末からの送信電力	22
2.19	測定 2(市街を多く走行) における端末からの送信電力	22
2.20	本測定で得られた基地局からの電力密度と文献値 [16] の比較	24
2.21	測定 1(郊外を多く走行) の走行ルートと対象とした測定地域	26
2.22	測定 2(市街を多く走行) の走行ルートと対象とした測定地域	26
2.23	各地域における基地局からの電界強度	27
2.24	各地域における端末からの送信電力	28
2.25	「繁華街・オフィス街」における端末からの送信電力の時間変化 (抜粋)	28
3.1	重み付けの例	31

3.2	20 歳 Taro [24] の肩モデル	33
3.3	端末モデル	35
3.4	端末モデルの配置図 (Cheek ポジション)	35
3.5	第 3 世代以降の携帯電話端末のメーカーによって公表されている 10g 平均 SAR の最 大値	36
3.6	端末の iSAR による SAR 測定イメージ	36
4.1	各場所における基地局および端末による脳の 1g 平均 SAR	39
4.2	各場所における基地局および端末による脳全体の平均 SAR	39
4.3	各地域における基地局および端末による脳の 1g 平均 SAR の最大値	41
4.4	各地域における基地局および端末による脳全体の平均 SAR	41
A.1	計算モデル (TARO モデル)	49
A.2	平面波正面方向入射時の脳の 1g 平均 SAR における全身モデルとの相対差	51
A.3	垂直偏波・水平偏波入射の相対差の差異の考察	52
B.1	7 歳 Taro [24] の肩モデル	55
B.2	20 歳 Taro [24] の肩モデル	55

表 目 次

2.1	基地局からの電界強度の測定条件	7
2.2	音声有、無に対する通話時間	17
2.3	音声の有無による端末からの送信電力の平均値および中央値の比較	18
2.4	基地局からの電界強度のパーセンタイル値および平均値	23
2.5	端末からの送信電力のパーセンタイル値および平均値	23
2.6	本測定で得られた端末からの送信電力と文献値の比較	25
2.7	対象とした測定地域 7 箇所	25
3.1	基地局による SAR を求めるための計算条件	33
3.2	脳組織の密度 [26]	33
3.3	端末による SAR を求めるための計算条件	35
A.1	計算条件	49
A.2	SAR の値が大きいところに注目したときの脳の 1g 平均 SAR における各モデルと 全身モデルとの相対差	51
B.1	基地局による SAR を求めるための 7 歳モデルの計算条件	56
B.2	基地局による SAR を求めるための 20 歳モデルの計算条件	56
B.3	端末による SAR を求めるための 7 歳モデルの計算条件	57
B.4	端末による SAR を求めるための 20 歳モデルの計算条件	57
B.5	9 号館 9 階の廊下における基地局および端末による脳の 1g 平均 SAR の最大値 . . .	57
B.6	9 号館 9 階の廊下における基地局および端末による脳全体の平均 SAR	57

第 1 章

序論

1.1 研究背景

携帯電話使用の増加に伴い、携帯電話端末から発生する高周波電磁界による人体へのばく露が健康に影響を与える可能性について関心が高まっている。携帯電話使用と脳腫瘍などの発生率を調査する研究が必要があるとされた [1]。このことを受け、世界保健機関 (WHO, World Health Organization) の付属機関である国際がん研究機関 IARC(International Agency for Research on Cancer) によって、携帯電話使用と脳腫瘍との関連性を検討する国際共同症例対照研究 (INTERPHONE 研究と呼ばれる) が実施された [2] [3]。この研究は、携帯電話端末使用者が端末からの電波に多くばく露されると予想された組織に生じる腫瘍 (神経膠腫、髄膜腫などの脳腫瘍) に焦点を当てた [2]。その結果、2011 年 5 月に、IARC より携帯電話端末からの電波に対して「発がん性があるかもしれない」と評価された [4]。このような懸念から、現在でも携帯電話使用と脳腫瘍との関連性を検討する研究が行われている [5] [6]。Mobi-kids 研究では、10 - 24 歳の小児・若年期を対象に携帯電話使用と脳腫瘍との関連性を検討している [6]。

疫学研究では携帯電話端末による脳へのばく露の指標として、携帯電話端末の累積通話時間が主に用いられている [2] [7]。症例群 (脳腫瘍患者) と対照群 (脳腫瘍に罹患していない) の被験者が受けた携帯電話端末によるばく露の違いがあるかを調べ、携帯電話使用と脳腫瘍との関連性を検討する。その際、携帯電話端末の種類や通信システム、周波数帯などの端末の使用状態についても考慮する必要がある [8]。加えて、端末からの電波がどのくらい人体の脳部に吸収されたかを評価するために、組織が単位質量に単位時間吸収されるエネルギー量を表す SAR(Specific Absorption Rate, 比吸収率) が用いられている [9] [10]。携帯電話端末によるばく露は局所的なばく露であるため、携帯電話端末によるばく露と脳腫瘍発症の関連性があるとすれば、携帯電話端末によってばく露された位置に脳腫瘍が発生する可能性が高くなると予測される。しかし、各携帯電話端末による SAR についてそれぞれ検討することは困難であるため、携帯電話端末による SAR の測定値に基づき、数値解析を用いて携帯電話端末による SAR の分布を推定する方法が提案されている [11]。このように、携帯電話端末によるばく露量の評価が行われてきた。

一方、携帯電話は主に TDMA(Time Division Multiple Access) 方式を用いて通信を行う第 2 世代携帯電話から CDMA(Code Division Multiple Access) 方式を用いた第 3 世代携帯電話に移行している。日本では現在第 3 世代以降のみとなっている。実環境下で使用した場合における第 3 世代以降の携帯電話端末からの送信電力の平均値は、従来の第 2 世代以前に比べてはるかに小さくなっている [12]。そのため、疫学研究において携帯電話使用と脳腫瘍との関連性を検討するにあたり、携帯電話端末以外による脳のばく露が無視できなくなっている可能性がある。携帯電話端末以外による脳のばく露は第 3 世代携帯電話端末によるばく露を評価する際に有意となりえるかどうか検討する必要がある。

1.2 本論文の目的

本論文では、携帯電話端末以外によるばく露として携帯電話基地局からの電波によるばく露に着目し、携帯電話基地局および第 3 世代携帯電話端末からの電波による脳へのばく露を評価し、比較することを目的とした。実環境下で携帯電話基地局からの電界強度および第 3 世代携帯電話端末からの送信電力を測定し、基地局からの電界強度および端末からの送信電力はどの程度であるかを調査した。また、実環境下での測定値に基づき、基地局および端末による脳のばく露量を推定した。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第 1 章では、研究背景と研究目的について述べた。

第 2 章では、実環境下における携帯電話基地局および第 3 世代携帯電話端末による脳のばく露量を評価するために、実環境下での基地局からの電界強度および端末からの送信電力がどの程度であるか確認するために行った測定について述べた。まず、基地局からの電界強度および端末からの送信電力がどの程度であるか、また屋内外でどう異なるかを確認するため、大学構内にて測定を行った。次に、基地局からの電界強度および端末からの送信電力が時間経過とともにどう変化するかを確認するため、定点における測定を行った。その際に、測定日による基地局からの電界強度の違いや、通話中の音声の有無による端末からの送信電力の違いについても検討した。最後に、測定地域による基地局からの電界強度および端末からの送信電力の違いを調査するため、東京都内の広範囲を車で移動しながら測定を行った。

第 3 章では、実環境下で得られた基地局からの電界強度および端末からの送信電力の平均値に基づいた基地局および端末による脳のばく露量を推定するための方法とモデルについて述べた。基地局および端末による脳のばく露は数値計算によって求めた。

第 4 章では、求めた脳のばく露量について述べた。実環境下での基地局および端末によるばく露量はガイドラインよりもはるかに小さいことが示された。両者を比較すると、場所によって一概には言えないが、屋内においては端末によるばく露は基地局よりも大きくなる場合があることが示され、屋外においては端末によるばく露は基地局よりも同程度か小さいことが示された。地域ごとにみると、基地局によるばく露は市街の方が郊外よりも大きくなり、端末によるばく露は郊外の方が市街よりも大きくなる傾向が示された。

第 5 章では、結論を述べた。

第 2 章

実環境下における基地局からの電界強度 および端末からの送信電力

2.1 はじめに

実環境下における携帯電話基地局および第 3 世代携帯電話端末による脳のばく露量を評価するために、実環境下での基地局からの電界強度および端末からの送信電力を調査した。

2.2 測定方法

基地局からの電界強度の測定には、ハンドヘルドのスペクトラムアナライザ SRM-3006 および 3 軸式電界プローブ 3502/01 型 (Narda Safety Test Solutions GmbH) を用いた。基地局からの電界強度の測定条件を表 2.1 に示す。基地局のすべての周波数帯の電界強度を同時に測定するために、測定周波数は 700 – 2200 MHz とした。アンテナの高さは文献値 [13] の測定条件を参考に地上から約 1.5 m とした。なお、2.3 の屋内外における測定では、測定者の身長の関係で高さは約 1.1 m となった。

表 2.1 基地局からの電界強度の測定条件

測定周波数	700 MHz – 2200 MHz
RBW	500 kHz
掃引時間	340 ms – 380 ms

SRM-3006 を用いて、電界強度の実効値の 6 分間の移動平均値を測定した。SRM-3006 はデータの連続保存は行えないため、データを 6 秒ごとに保存した。定点位置にて 24 時間などの長時間測定を行う場合には、SRM-3006 の内蔵メモリに記録できるデータ量を考慮し、データを 1 分ごとに保存した。基地局からの電界強度の周波数帯は、基地局から端末に向かう電波 (Downlink) の周波数帯から以下とした [14]。

- 860 MHz – 890 MHz(800 MHz 帯)
- 945 MHz – 960 MHz(900 MHz 帯)
- 1475.9 MHz – 1510.9 MHz(1.5 GHz 帯)
- 1844.9 MHz – 1879.9 MHz(1.8 GHz 帯)
- 2110 MHz – 2170 MHz(2 GHz 帯)

基地局からの電界強度として、Downlink の各帯域幅内におけるトータルの電界強度の実効値の 6 分間の移動平均値を求めた。帯域幅内のトータルの電界強度は SRM-3006 の仕様より以下の式 [15] で導出した。 E_{int} はトータルの電界強度を表し、 df はスペクトラムの間隔、 RBW は分解能帯域幅 (500 kHz)、 E_k は個々のスペクトラムの電界強度を表している。スペクトラムの間隔は RBW の 2 分の 1 の値 (250 kHz) であった。

$$E_{int} = \sqrt{\frac{df}{1.0552 * RBW} \sum_{k=1}^n (E_k)^2} \quad (2.1)$$

端末からの送信電力測定には、SMP(Software Modified Phone, 通話情報記録端末) を用いた。SMP とは、第 3 世携帯電話の一種であり、CDMA2000 方式を用いた端末である。通話時刻や周波数帯など通話情報を 1 秒ごとに記録することができる。

2.3 屋内外における検討

まず、基地局からの電界強度および端末からの送信電力がどの程度であるか、また屋内外でどう異なるかを確認するため、大学構内にて測定を行った。

2.3.1 移動ルートと測定対象とする場所

測定機器を持ちながら、首都大学東京南大沢キャンパス構内の 9 号館、カフェテリア館、駐車場などを移動して測定を行った。移動中、任意に選んだ 6 箇所にて 10 分間留まりその場所における測定値を記録した。測定風景を図 2.1 に示す。移動ルートは大学構内の 9 号館 9 階の廊下 (屋内) からスタートし、9 号館 1 階 (屋内)、12 号館とカフェテリア館の間 (屋外)、カフェテリア館 (屋内)、9 号館近くの駐車場 (屋外)、9 号館 5 階実験室の順に移動した。各場所ではそれぞれ 10 分間留まりその場所における測定値を記録した (図 2.2)。

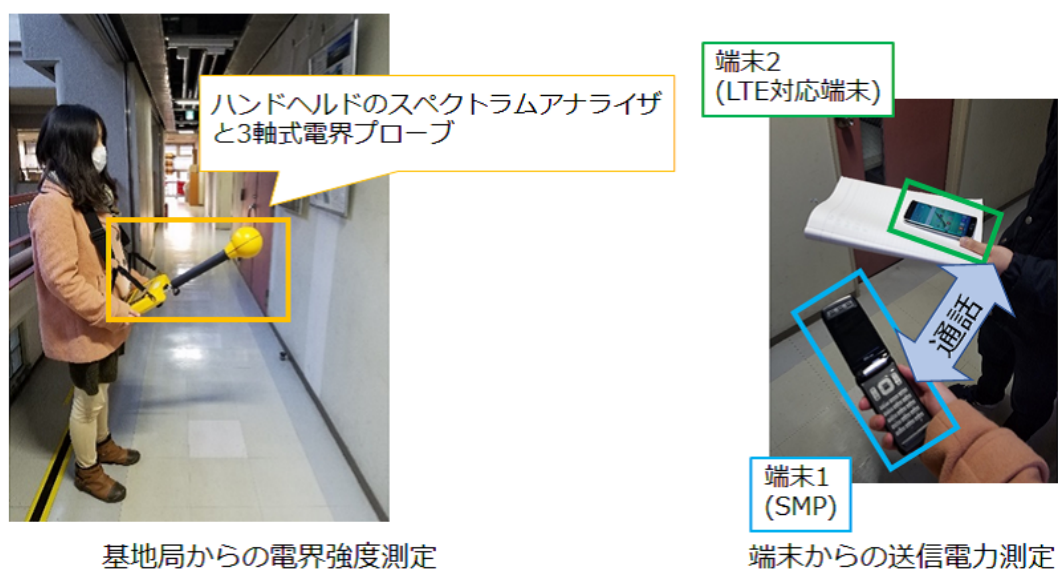


図 2.1 測定風景 (屋内外における検討)

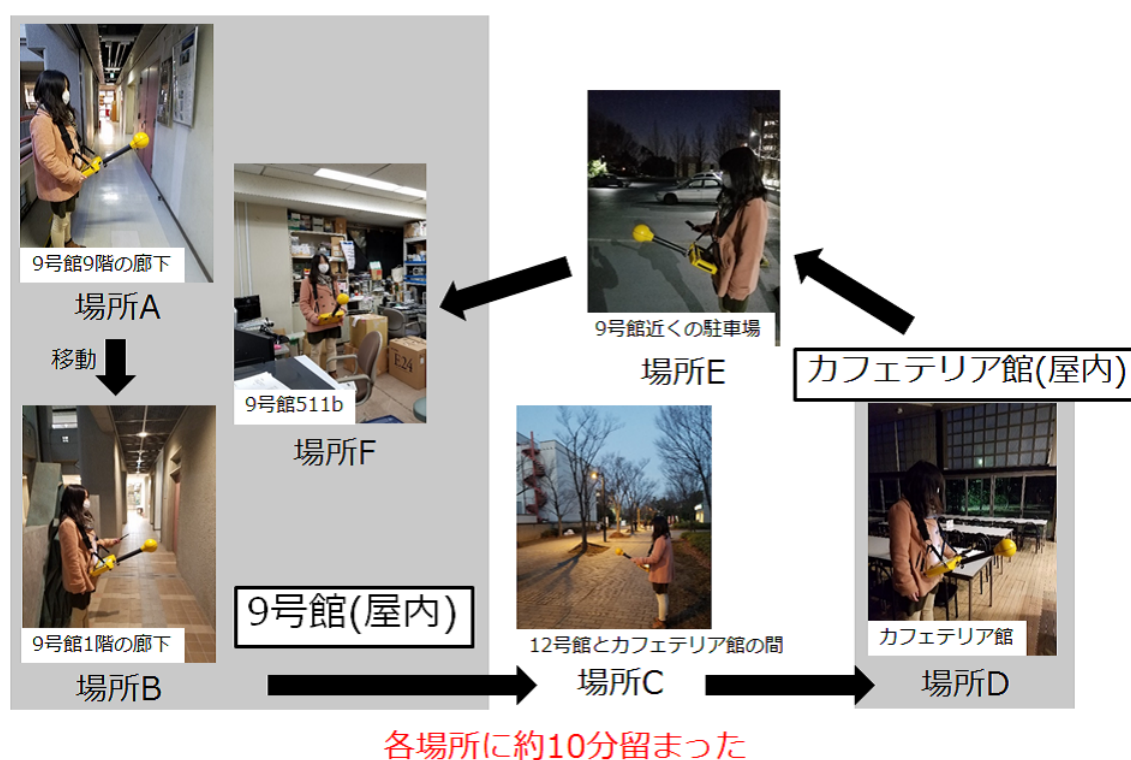


図 2.2 移動ルートと測定場所

2.3.2 各場所における基地局からの電界強度および端末からの送信電力

移動に応じた基地局からの電界強度の 6 分間の移動平均値を図 2.3 に示す。移動に応じた端末からの送信電力を図 2.4 に示す。10 分間留まり測定した、各場所における基地局からの電界強度を図 2.5 に示す。●は平均値 (2 乗平均平方根)、エラーバーは 6 分間の移動平均値における最大と最小を示す。また、10 分間留まり測定した、各場所における端末の通話中の送信電力を図 2.6 に示す。■は平均値、エラーバーは最大と最小を示す。基地局からの電界強度および端末からの送信電力の平均値は場所によって様々であった。図 2.6 より、端末からの送信電力の平均値は SMP の通信方式である CDMA2000 方式を用いた端末からの送信電力の最大値 200 mW (23 dBm) に比べてはるかに小さいことが示された。駐車場のよう電波が届きやすいような場所では、基地局からの電界強度は大きく端末からの送信電力は小さい傾向が示された。また、屋内の廊下や屋外であっても周辺の建物に囲まれており電波が届きにくいような場所では、基地局からの電界強度は小さく端末からの送信電力は大きくなる傾向も示された。

屋内外による基地局からの電界強度および端末による送信電力の検討は、さらに様々な条件下で測定を行い、またその場所で周辺に基地局があるかどうかを調べ、こういった場所でどのような傾向が見られるか調査を行う必要があると考えられる。

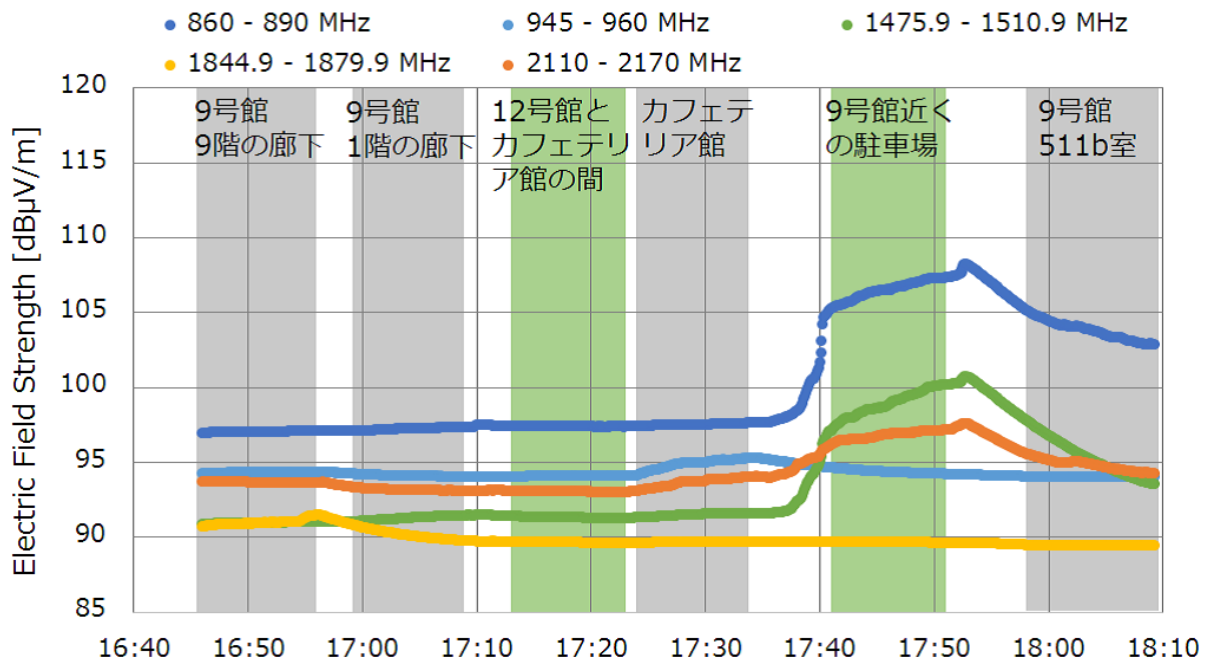


図 2.3 移動に応じた基地局からの電界強度の 6 分間の移動平均値

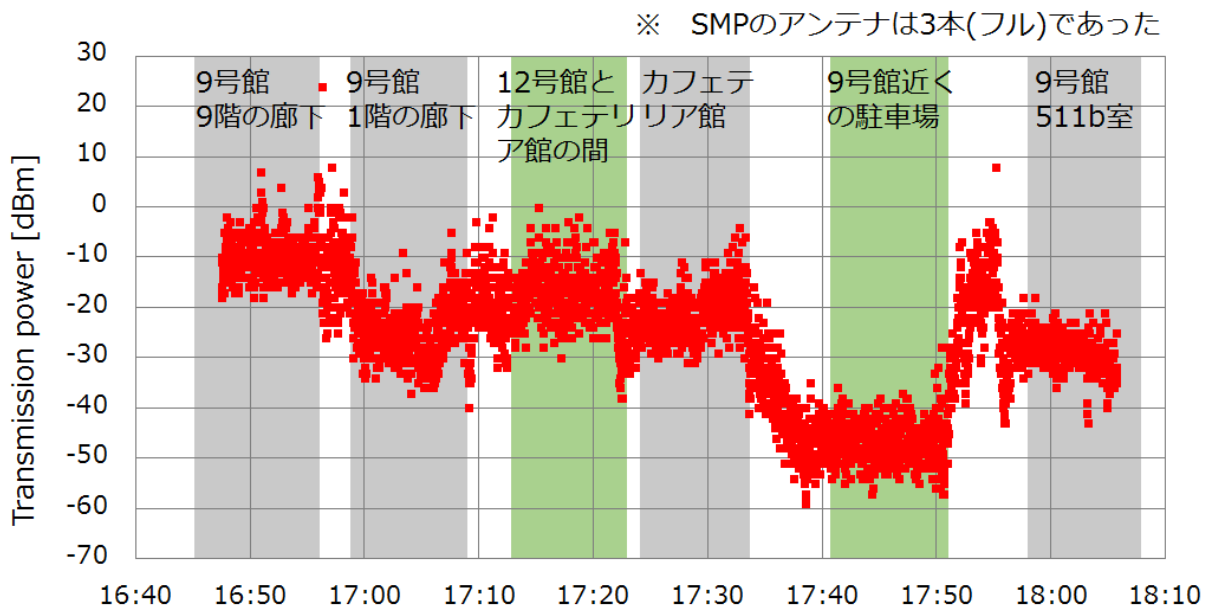


図 2.4 移動に応じた端末からの送信電力

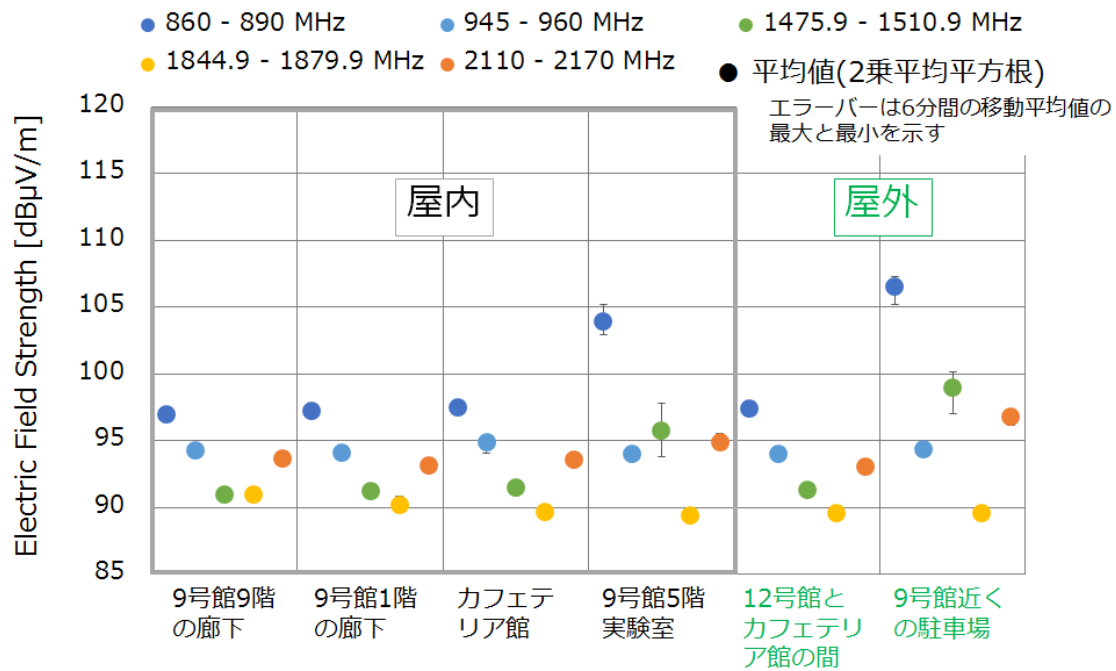


図 2.5 各場所における基地局からの電界強度

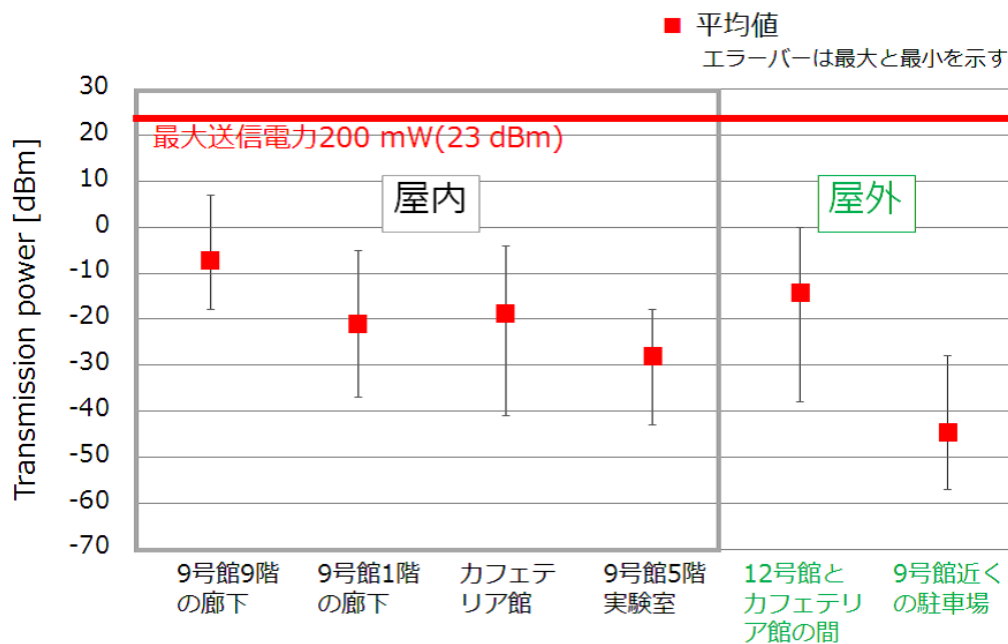


図 2.6 各場所における端末からの送信電力

2.4 定点における測定

2.4.1 定点における 24 時間測定

次に、基地局からの電界強度および端末からの送信電力が時間経過とともにどう変化するかを確認するため、大学構内にて 24 時間測定を行った。

測定場所は 2.3 で行った測定場所から 9 号館 5 階の実験室 (屋内) を選択した。9 号館 5 階実験室の概略と測定風景を図 2.7、図 2.8 に示す。電界プローブは、実験室の窓から約 2 m 離れた場所に設置した。そのため屋内の中でも窓が近い場所である。電界プローブのそばに端末を置き、1 回の通話で 1 - 6 時間通話を行った。これらの測定は平日 13 時から翌日の 13 時の 24 時間行われた。なお、実験室は日中から夜にかけて人が数名出入りしたり作業をする状態が続いていた。

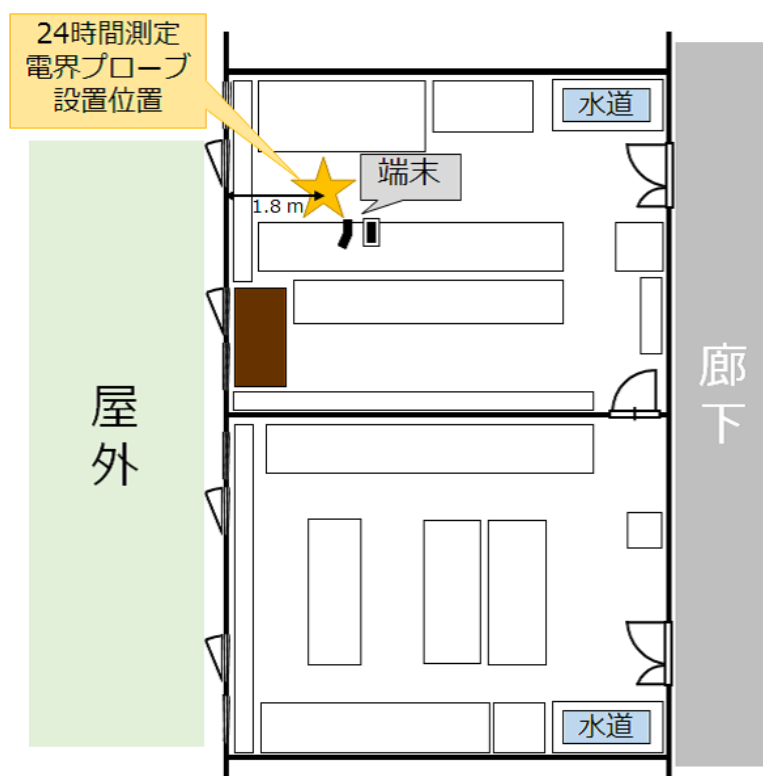


図 2.7 9 号館 5 階実験室概略



図 2.8 測定風景 (定点における 24 時間測定)

得られた基地局からの電界強度の 6 分間の移動平均値における 24 時間の推移を図 2.9 に示す。基地局の時間変化は周波数帯によるがおよそ $0 - 3$ dB ほどであった。明け方の $3 - 7$ 時の時間帯は比較的電界強度の時間変化が少なく、日中の方が大きかった。端末からの送信電力における 24 時間の推移を図 2.10 に示す。送信電力は 0 dBm 以上はわずかであり、おおむね $-45 - -20$ dBm で推移していた。

この測定は東京都内の八王子市にて行われた測定であり、他にも都心部の繁華街やオフィス街などではどうであるかを検討する必要があると考えられる。

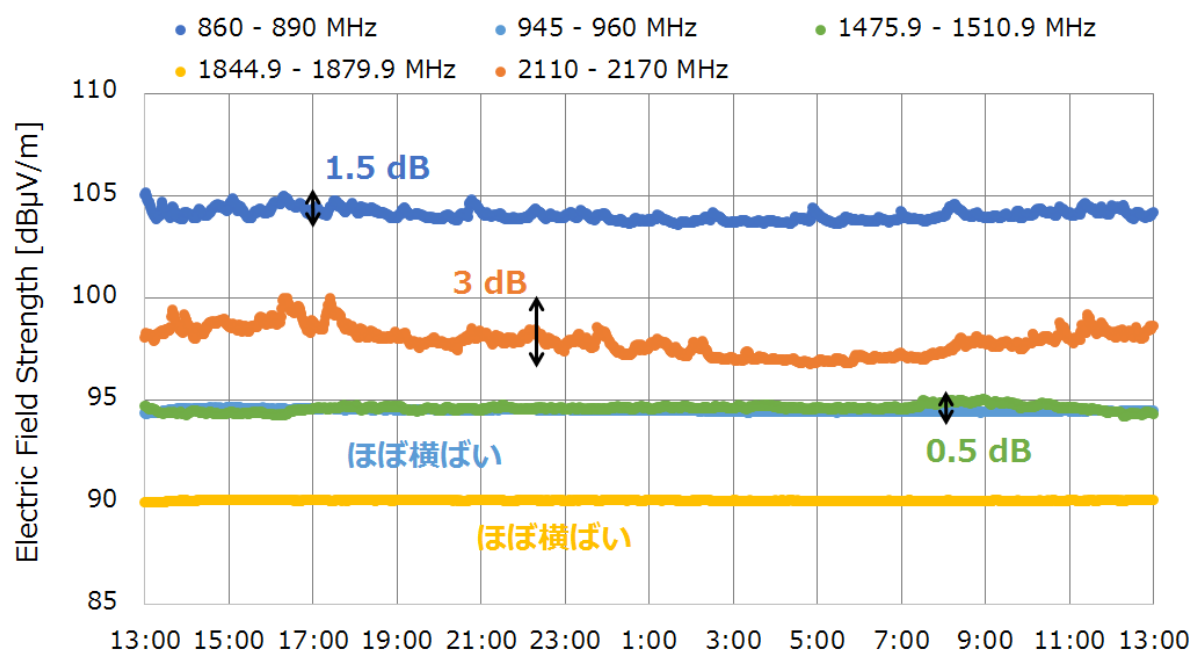


図 2.9 基地局からの電界強度の 6 分間の移動平均値における 24 時間の推移

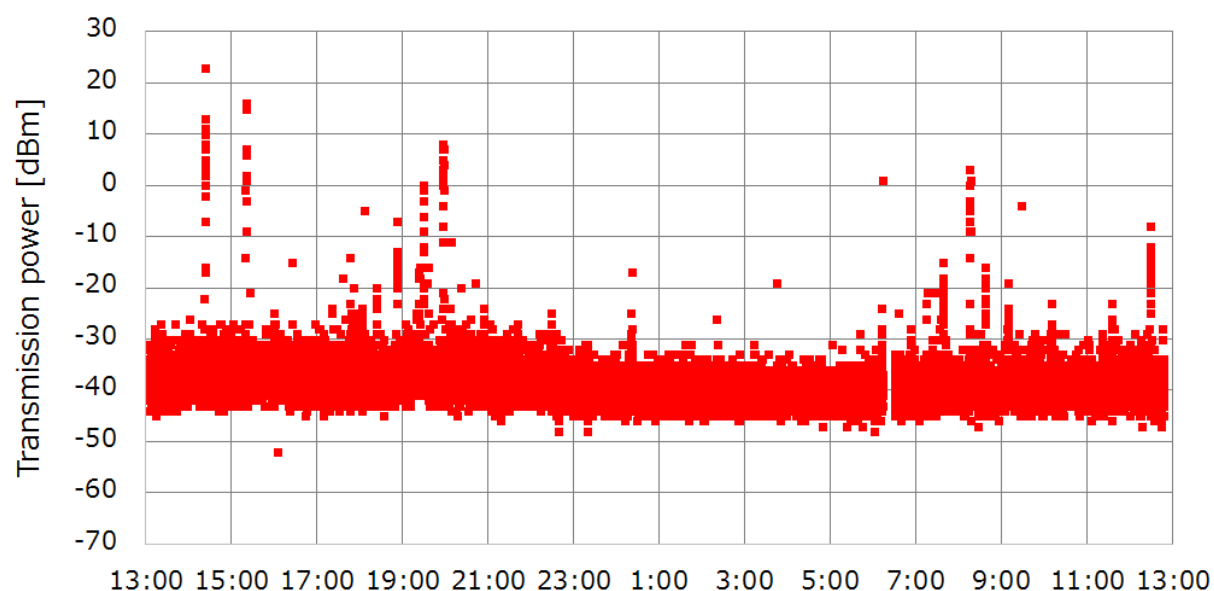


図 2.10 端末からの送信電力における 24 時間の推移

2.4.2 測定日による基地局からの電界強度の差

ここでは、基地局からの電界強度が測定日によってどう変化するか検討したものについて述べる。測定環境は 2.4.1 の 24 時間測定と同じようにした。ただし、その日の測定では実験室には人の出入りはほとんどなかった。測定は 15 – 20 時の時間に行われた。スペクトラムアナライザ SRM-3006 は 6 分間の移動平均値を 1 分ごとに記録した。

図 2.11 に、基地局からの電界強度の 6 分間の移動平均値の推移を示す。測定日による電界強度の違いは、周波数帯によるが最大 4 dB ほどであった。

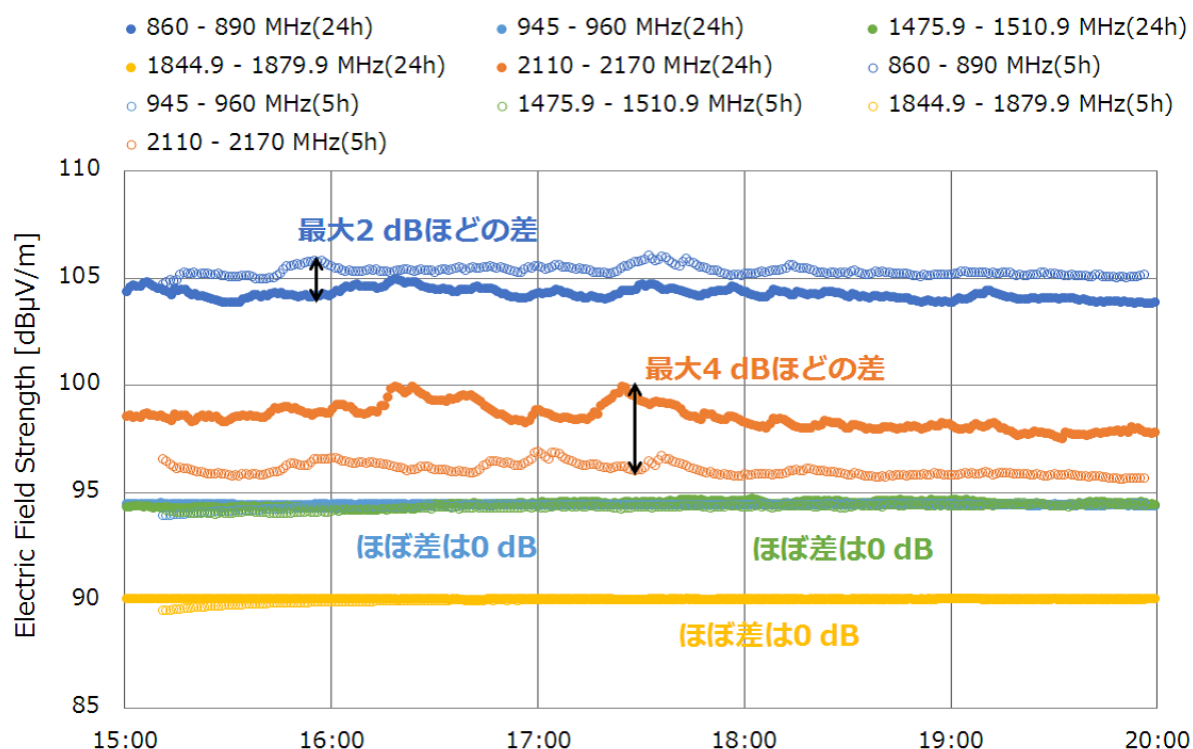


図 2.11 基地局からの電界強度の 6 分間の移動平均値における測定日による違い

2.4.3 音声の有無による端末からの送信電力の差

2.4.1 の 24 時間測定では音声を意図的に端末に向かって発することはせず、音声が無い状態として測定を行った。ただし、実験室に人がいた時間は物音や話声などを拾っている場合があった。ここでは、通話中に音声を端末に向かって発している状態を音声有の場合として、音声有の場合と無の場合で端末からの送信電力がどう変化するか調査した。測定風景を図 2.12 に示す。端末の中央手前にスピーカーを設置し、音声を流すことによって音声有の状態を作らした。音声無の場合は、スピーカーから音声を流さない状態とした。ただしスピーカーから音声を流していても、測定場所の近くに人が作業をしたり出入りをしているときは物音や話し声を拾ってい

る場合もある。1 回の通話を 20 分間とし、音声有の状態、無の状態をそれぞれ約 10 分間作った。音声有、無それぞれに対する通話時間を表 2.2 に示す。なお、この測定中における基地局からの電界強度の 6 分間の移動平均値の時間変化は 0 - 1 dB ほどであった。



図 2.12 測定風景 (音声の有無における検討)

表 2.2 音声有、無に対する通話時間

	測定時間	
	音声有	音声無
測定 1	17:31 - 17:41	17:21 - 17:31
測定 2	17:42 - 17:52	17:52 - 18:02

得られた端末からの送信電力の推移を図 2.13 に示す。また、音声の有無による送信電力の平均値および中央値を表 2.3 に示す。音声がある場合の方が音声がない場合に比べて送信電力の平均値は 2 - 4 dB、中央値は 2 dB 大きくなった。ただし、音声有と無の場合の測定時間は異なる。この結果はあくまで 20 分間通話するうちそれぞれ 10 分間を音声有、無とした場合であるため、データのサンプルは限られる。音声の有無と端末からの送信電力の差についてはより多くデータを取り検討する必要があると考えられる。

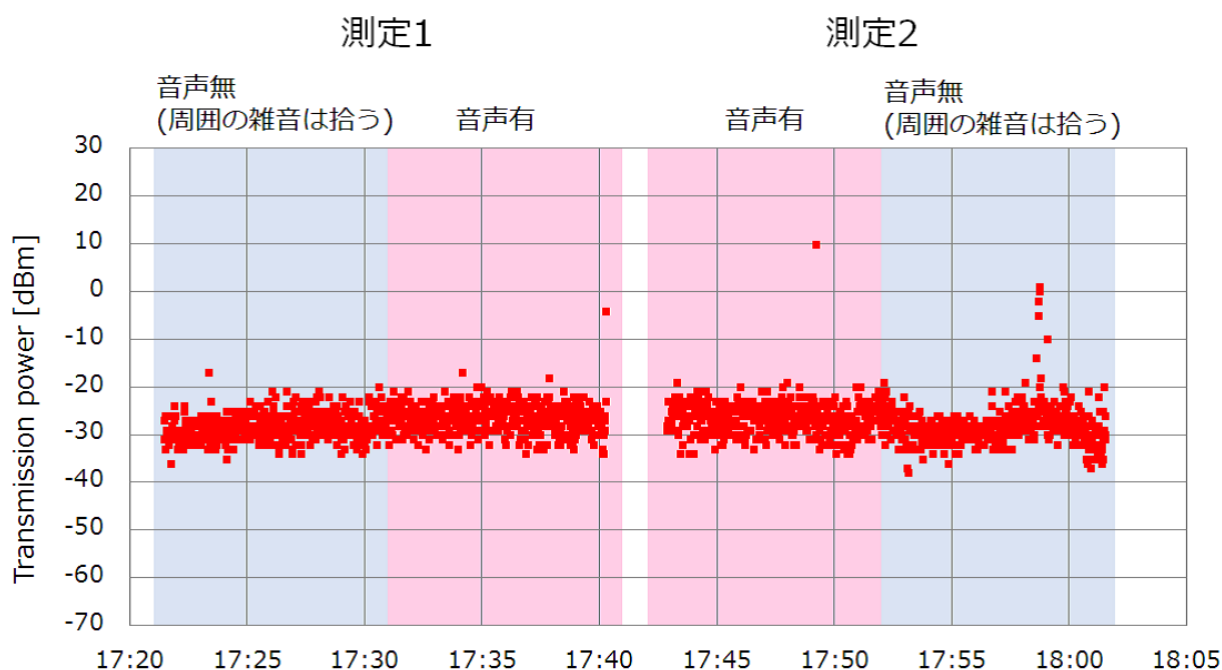


図 2.13 端末からの送信電力

表 2.3 音声の有無による端末からの送信電力の平均値および中央値の比較

	平均値		中央値	
	音声有	音声無	音声有	音声無
測定 1	3.5 μ W (-25 dBm)	1.8 μ W (-27 dBm)	2.5 μ W (-26 dBm)	1.6 μ W (-28 dBm)
測定 2	21 μ W (-17 dBm)	7.7 μ W (-21 dBm)	2.5 μ W (-26 dBm)	1.6 μ W (-28 dBm)

2.5 東京都内移動時における検討

次に、より広範囲の場所を測定した場合における、測定地域による基地局からの電界強度および端末からの送信電力の違いを調査するため、東京都内の郊外駅周辺、繁華街、住宅地などの様々な地域を車で走行しながら測定を行った。

2.5.1 走行ルート

測定地域による基地局からの電界強度および端末からの送信電力の違いを調査するため、郊外駅周辺、繁華街、住宅地などの様々な地域を車で走行しながら測定を行った。この測定は測定機器を車内に設置し行った。基地局からの電界強度の測定風景を図 2.14 に示す。この測定より得られる基地局からの電界強度および端末からの送信電力は屋外の場合の値であるとした。測定は 2

日かけて行い、走行距離は約 150 km、走行時間は約 8 時間であった。走行ルートを図 2.15 に示す。走行ルートは測定 1 として郊外を多く走行、測定 2 として市街を多く走行するルートとした。



図 2.14 測定風景 (東京都内移動時における測定)



図 2.15 走行ルート

- 測定 1: 大学出発→立川駅周辺→青梅駅周辺→あきる野市→八王子市→町田市→大学到着
- 測定 2: 大学出発→新宿駅周辺→渋谷駅周辺→目黒区→世田谷区→稲城市→多摩市→大学到着

2.5.2 基地局からの電界強度および端末からの送信電力

得られた基地局からの電界強度の 6 分間の移動平均値を図 2.16、図 2.17 に示す。図 2.16 は測定 1(郊外を多く走行)、図 2.17 は測定 2(市街を多く走行) で得られた値である。端末からの送信電力を図 2.18、図 2.19 に示す。図 2.18 は測定 1(郊外を多く走行)、図 2.19 は測定 2(市街を多く走行) で得られた値である。基地局からの電界強度は駅周辺や繁華街など人が多く賑わうようなところで大きく住宅地などで小さい傾向が見られた。

基地局からの電界強度および端末からの送信電力の 10、50、90 パーセンタイル値、平均値を求めたものを表 2.4、表 2.5 にそれぞれ示す。基地局からの電界強度は各周波数帯ごとの値を示す。平均値は 2 乗平均平方根を取ったものとした。端末からの送信電力は、SMP の周波数帯の記録が通話開始直後に用いた周波数帯のみ記録されてしまうため、通話時に用いていた周波数帯を測定時間ごとに確認することができなかった。そのため、すべての測定値よりパーセンタイル値、平均値を求めた。基地局からの電界強度のパーセンタイル値、平均値 (2 乗平均平方根) は、測定 2 の市街を多く走行した場合の方が測定 1 の郊外を多く走行した場合に比べて大きかった。端末からの送信電力のパーセンタイル値、平均値は、測定 2 の市街を多く走行した場合の方が測定 1 の郊外を多く走行した場合に比べて大きかった。測定 2 の市街を多く走行した場合では、端末の通話が途中で途切れてしまう現象が確認されており、周辺の建物に電波が遮られたり道路を走行中端末の移動速度対して電波が受信できなかったことなどが原因として考えられる。

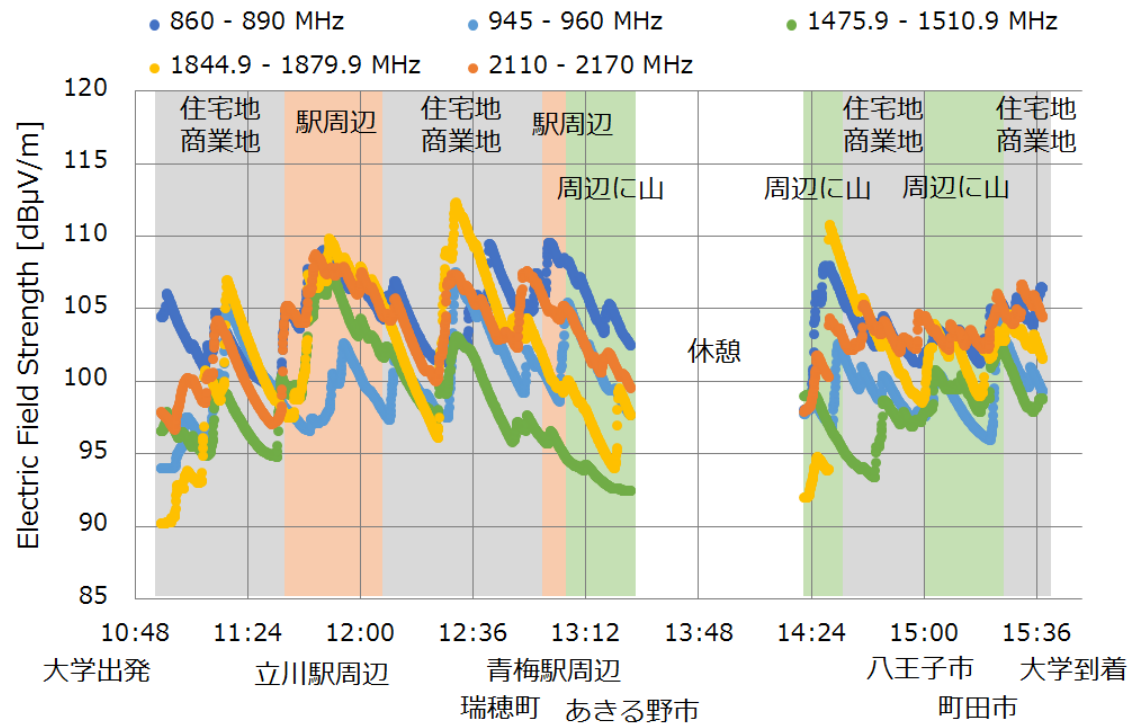


図 2.16 測定 1(郊外を多く走行) における基地局からの電界強度の 6 分間の移動平均値

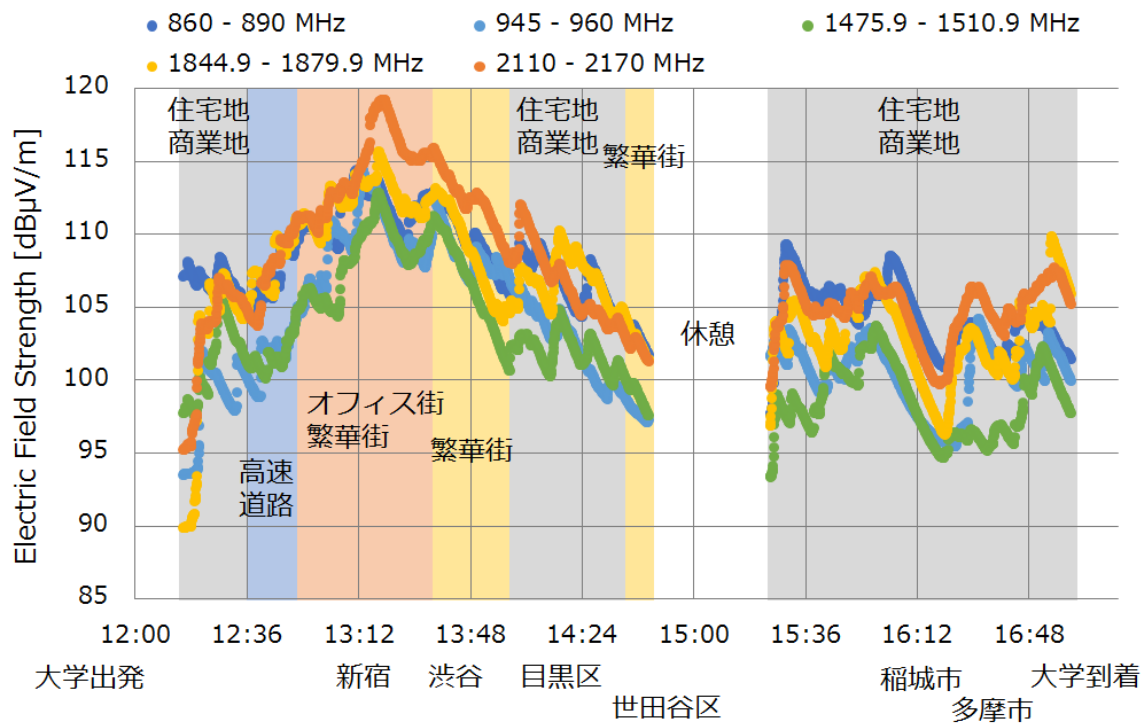


図 2.17 測定 2(市街を多く走行) における基地局からの電界強度の 6 分間の移動平均値

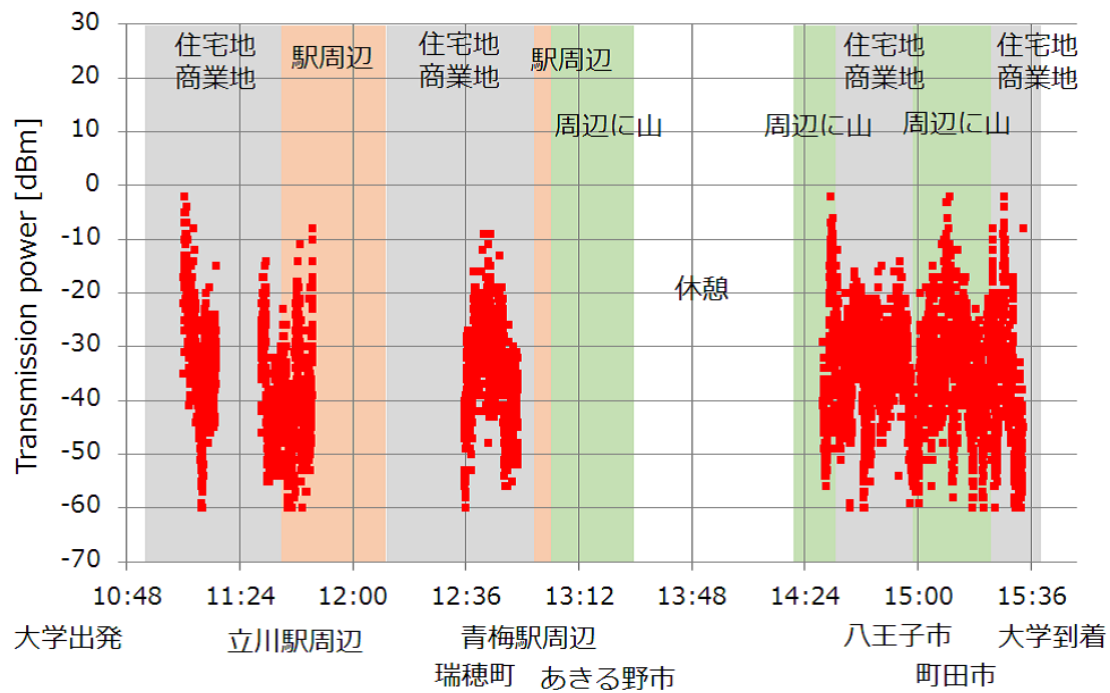


図 2.18 測定 1(郊外を多く走行)における端末からの送信電力

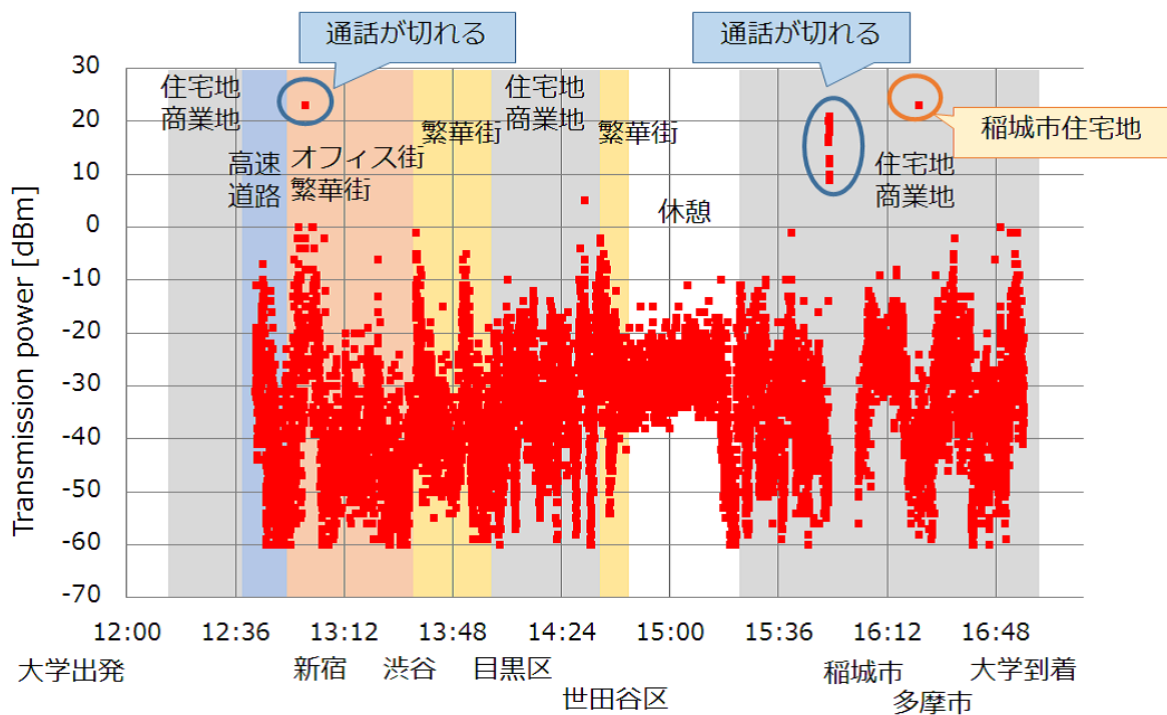


図 2.19 測定 2(市街を多く走行)における端末からの送信電力

表 2.4 基地局からの電界強度のパーセンタイル値および平均値

		10th percentile	50th percentile	Average(RMS)	90th percentile
800 MHz 帯	測定 1	0.11 V/m	0.16 V/m	0.18 V/m	0.25 V/m
	測定 2	0.13 V/m	0.20 V/m	0.25 V/m	0.40 V/m
900 MHz 帯	測定 1	0.07 V/m	0.10 V/m	0.11 V/m	0.14 V/m
	測定 2	0.08 V/m	0.13 V/m	0.18 V/m	0.32 V/m
1.5 GHz 帯	測定 1	0.05 V/m	0.08 V/m	0.10 V/m	0.14 V/m
	測定 2	0.06 V/m	0.13 V/m	0.16 V/m	0.28 V/m
1.8 GHz 帯	測定 1	0.06 V/m	0.13 V/m	0.16 V/m	0.25 V/m
	測定 2	0.11 V/m	0.20 V/m	0.25 V/m	0.40 V/m
2 GHz 帯	測定 1	0.09 V/m	0.14 V/m	0.16 V/m	0.22 V/m
	測定 2	0.14 V/m	0.20 V/m	0.32 V/m	0.56 V/m

表 2.5 端末からの送信電力のパーセンタイル値および平均値

		10th percentile	50th percentile	Average(RMS)	90th percentile
本測定	測定 1	10 nW	0.25 μ W	4.0 μ W	5.0 μ W
	測定 2	13 nW	0.40 μ W	0.16 mW	6.3 μ W

2.5.3 文献値との比較

本測定によって得られた基地局からの電界強度を、Jack T. Rowley らの文献 [16] と比較した。比較では、800 MHz 帯 (860 – 890 MHz)、900 MHz 帯 (945 – 960 MHz)、1.5 GHz 帯 (1475.9 – 1510.9 MHz)、1.8 GHz 帯 (1844.9 – 1879.9 MHz)、2 GHz 帯 (2110 – 2170 MHz) [14] の各帯域幅内のトータルの電界強度の 6 分間の移動平均値のデータを用いた。各帯域幅内のトータルの電界強度の全測定データのうち、6 分間の移動平均値の最大と最小、平均値 (2 乗平均平方根) をそれぞれ求めた。文献では電力密度 [μ W/cm²] の値を用いて比較をしているため、測定値も電界強度 [dB μ V/m] から電力密度 [μ W/cm²] に換算した。電力密度の値は、電界強度 [V/m] の 2 乗を自由空間中のインピーダンス 377 Ω で除したものとした。図 2.20 に比較を示す。

文献値では、日本の電力密度の最大値、平均値は他の国に比べて小さいが、本測定によって得られた電力密度の値は他の国と同程度かやや小さい値であった。測定で得られた電力密度の方が、日本の文献値よりも約 10 倍 – 100 倍以上高い結果が得られた。平均値で比較すると、本測定で得られた電力密度はオーストラリアやオーストリアと同程度であった。文献での日本のデータと本測定で得られたデータが異なる理由としては、文献で引用している日本のデータは総務省の文

献値 [17] の、固定の位置である特定の基地局の電波を測定したデータであるが、本測定で得られたデータは住宅地や駅周辺などを車で移動しながらすべての帯域の電波を測定し、各周波数帯域のトータルの電界強度を求めたデータであるため、こうした測定環境や条件によって生じた違いと思われる。

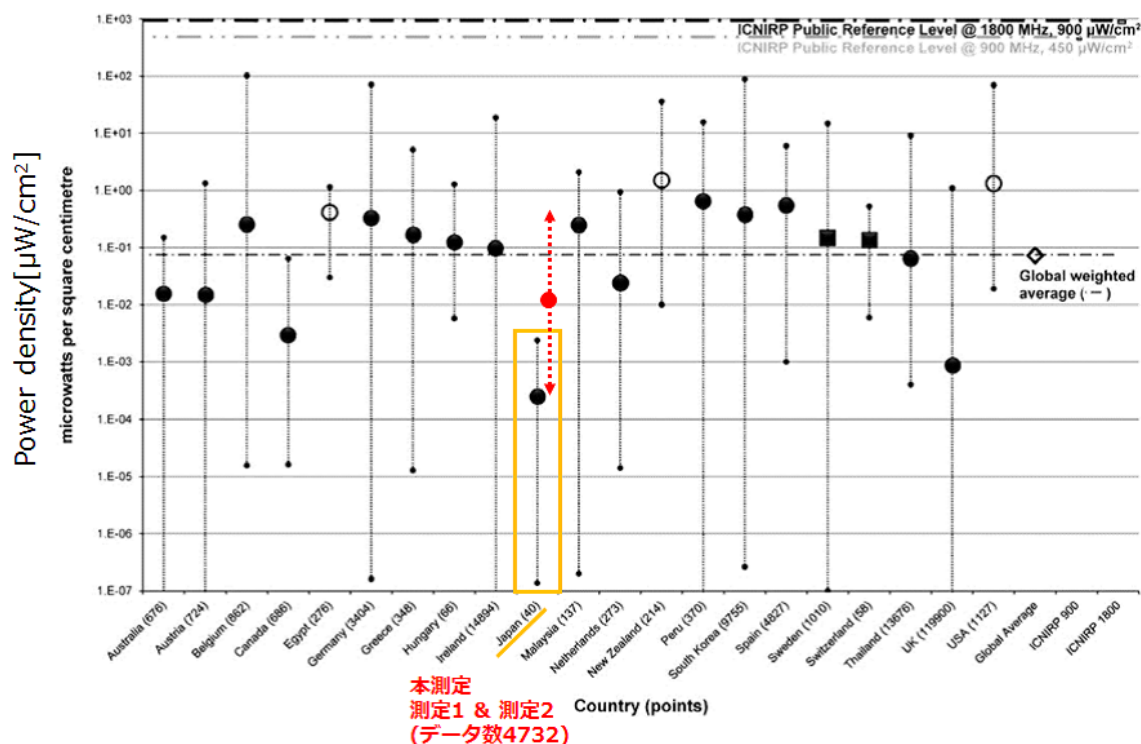


図 2.20 本測定で得られた基地局からの電力密度と文献値 [16] の比較

次に、第 3 世代携帯電話端末からの送信電力を、我々の研究グループによって行われた先行研究 [18] および Azeddine Gati らの文献値 [12] と比較した。比較を表 2.6 に示す。我々の研究グループによって行われた先行研究では、関東在住の 198 人の学生ボランティア (10 - 24 歳) に 1 ヶ月 SMP を使用してもらい通話情報を記録した。

本測定で得られた端末からの送信電力のパーセンタイル値および平均値は、先行研究 [18] に比べて小さかった。先行研究は数年前に行われた結果であり、本測定と電波環境が異なることによる違いなどが考えられる。また、Gati らの文献値 [12] と比較すると本測定で得られた端末からの送信電力の平均値は文献値よりも小さかった。

表 2.6 本測定で得られた端末からの送信電力と文献値の比較

		10th percentile	50th percentile	Average(RMS)	90th percentile
本測定	測定 1	10 nW	0.25 μ W	4.0 μ W	5.0 μ W
	測定 2	13 nW	0.40 μ W	0.16 mW	6.3 μ W
先行研究 [18]		1.0 μ W	25 μ W	0.84 mW	0.5 mW
文献値 [12]	Outdoor	—	—	< 1 mW	—

2.5.4 地域ごとにおける基地局からの電界強度および端末からの送信電力の平均値

次に、各地域ごとに基地局からの電界強度および端末からの送信電力の平均値を求めた。基地局の平均値は 2 乗平均平方根を求めた。走行ルート (図 2.15) のうち任意に選択した約 2 km \times 2 km 区画内の地域 7 箇所を対象とし、各地域内の基地局からの電界強度および端末からの送信電力の平均値を求めた。

対象地域とその地域の人口密度、測定時間を表 2.7 に示す。人口密度は平成 22 年 (2010 年) の国勢調査のデータを利用した。国勢調査は、緯度、経度を約 1 km \times 1 km に区画した基準地域メッシュ [19] に応じた人口密度が示されており、この基準地域メッシュ 4 つ分の区画内約 2 km \times 2 km の人口密度を求め、その地域の人口密度とした。国勢調査のデータは、各府省等の参画のもと総務省統計局が中心となり開発を行い、独立行政法人統計センターが運用管理を行っている政府統計の総合窓口「e-Stat」というサイトでダウンロードできる [20]。この人口密度のデータはその地域に住んでいる人を対象としているため、昼夜で人の移動が多く発生するような地域は一概にその地域の人口密度であるとはいえないが、ここでは参考値として示している。図 2.21 に測定 1 の走行ルートと対象とした測定地域 3 箇所、図 2.22 に測定 2 の走行ルートと対象とした測定地域 4 箇所を示す。

表 2.7 対象とした測定地域 7 箇所

	測定地域	測定地域の人口密度	測定時間
地域 A	郊外駅周辺 (立川駅周辺)	10614 人/km ²	2016/2/29 11:40 - 12:00
地域 B	住宅地 (瑞穂町～青梅市)	2517 人/km ²	2016/2/29 12:41 - 12:47
地域 C	住宅地 (八王子市～町田市)	2020 人/km ²	2016/2/29 15:09 - 15:11
地域 D	繁華街・オフィス街 (新宿駅周辺)	10940 人/km ²	2016/3/1 12:56 - 13:20
地域 E	住宅地 (目黒区～世田谷区)	21254 人/km ²	2016/3/1 13:43 - 13:53
地域 F	住宅地 (世田谷区)	16639 人/km ²	2016/3/1 14:17 - 14:28
地域 G	住宅地 (多摩市)	8447 人/km ²	2016/3/1 16:38 - 16:45



※ 人口密度は平成22年(2010年)の国勢調査のデータを利用

※ 測定時間はそれぞれ異なる

図 2.21 測定 1(郊外を多く走行)の走行ルートと対象とした測定地域



※ 人口密度は平成22年(2010年)の国勢調査のデータを利用

※ 測定時間はそれぞれ異なる

図 2.22 測定 2(市街を多く走行)の走行ルートと対象とした測定地域

得られた各地域における基地局からの電界強度を図 2.23 に示す。●は平均値 (2 乗平均平方根)、エラーバーは 6 分間の移動平均値における最大と最小を示す。また、各地域における端末の通話中の送信電力を図 2.24 に示す。■は平均値、エラーバーは最大と最小を示す。

基地局からの電界強度の平均値は郊外駅周辺や繁華街・オフィス街の方が住宅地よりも大きかった。端末からの送信電力の平均値は地域によって様々であった。住宅地の方が繁華街よりも大きい傾向も見られたが、地域によって一概にはいえなかった。繁華街・オフィス街 (新宿駅周辺) の送信電力の平均値が特に大きくなっているのは、通話が途中で途切れてしまう現象が確認されており (図 2.25)、通話が途切れる直前に大きい送信電力が生じた為と考えられる。

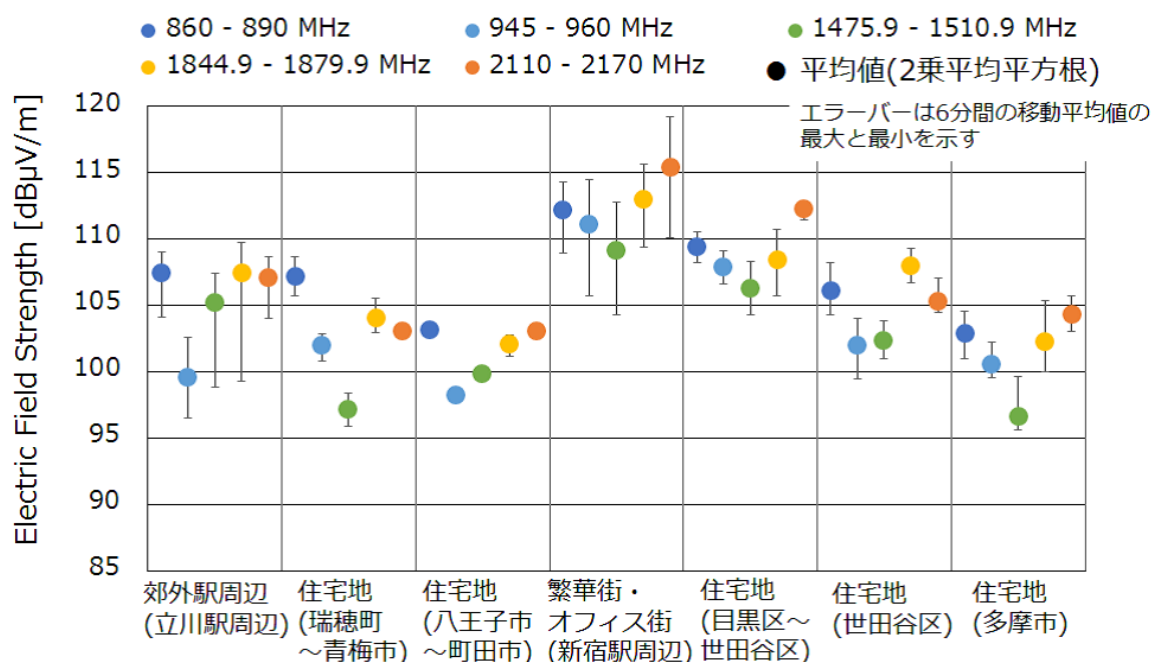


図 2.23 各地域における基地局からの電界強度

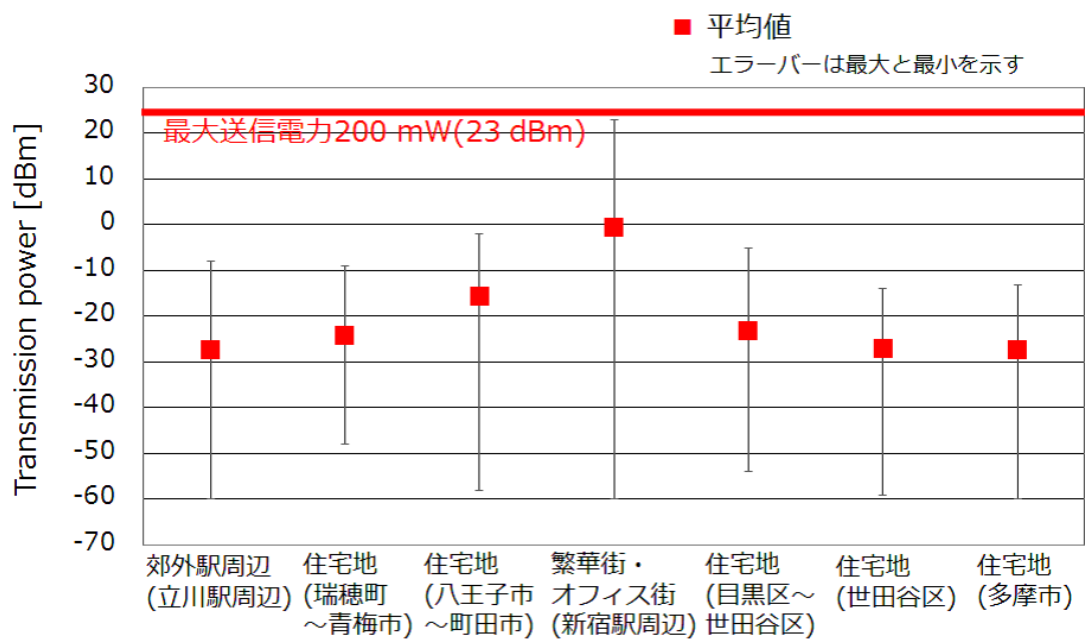


図 2.24 各地域における端末からの送信電力

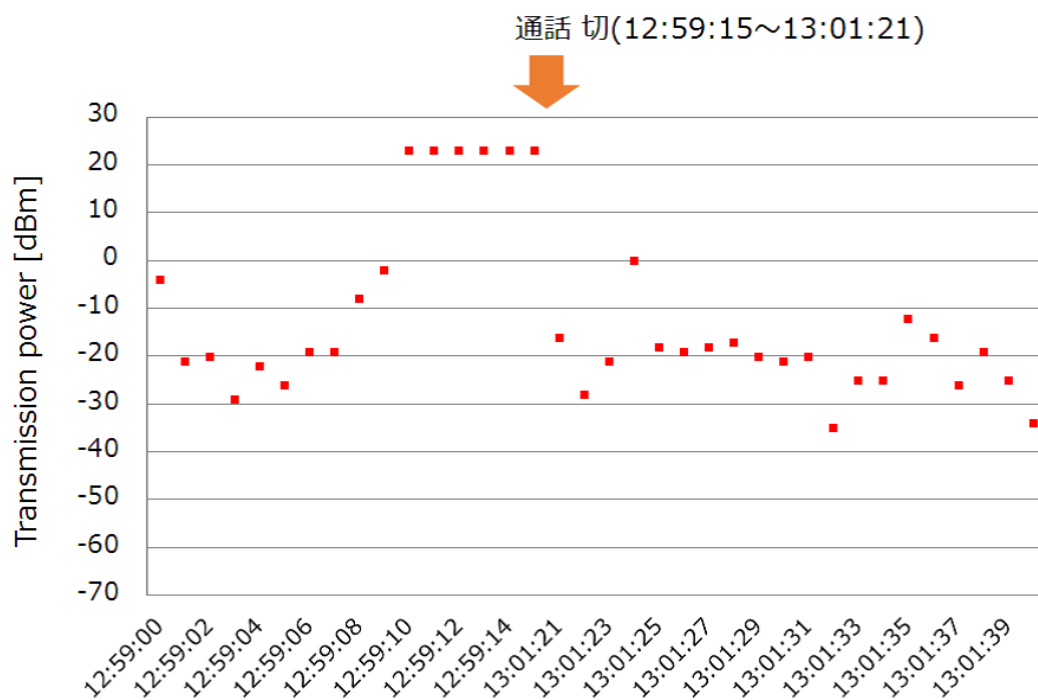


図 2.25 「繁華街・オフィス街」における端末からの送信電力の時間変化 (抜粋)

2.6 まとめ

実環境下における基地局からの電界強度および端末からの送信電力を調査した。これらの実環境下での端末からの送信電力の平均値は小さい値であることを確認した。各場所における基地局からの電界強度および端末からの送信電力の平均値は場所によって様々であり、駐車場のような電波が届きやすいような場所では基地局からの電界強度は大きく端末からの送信電力は小さい傾向が示された。基地局からの電界強度および端末からの送信電力の 24 時間の推移を確認すると、電界強度の時間変化は周波数帯によるがおよそ 0 - 3 dB ほどであった。送信電力は 0 dBm 以上はわずかであり、おおむね -45 - -20 dBm で推移していた。各地域における基地局からの電界強度および端末からの送信電力の平均値を求めたところ、基地局からの電界強度は繁華街などのほうが住宅地よりも大きく、端末からの送信電力は住宅地の方が繁華街などよりも大きい傾向を示した。ただし、測定地域によって必ずしもそうとはいえないことも示された。

第 3 章

脳のばく露量推定の為の方法とモデル

3.1 はじめに

実環境下で得られた基地局からの電界強度および端末からの送信電力の平均値に基づき、基地局および端末による脳のばく露量を数値計算により推定した。ここでは脳のばく露量を推定するための方法とモデルについて述べる。

3.2 ばく露量の指標

ばく露量の評価には、SAR(Specific Absorption Rate, 比吸収率 [W/kg]) を用いた。SAR は、単位質量の人体組織が単位時間あたりに吸収するエネルギーであり、以下の式で表される。E は電界強度 [V/m]、 σ は人体組織の導電率 [S/m]、 ρ は人体組織の密度 [kg/m³] を表す。

$$SAR[W/kg] = \frac{\sigma|E|^2}{\rho} \quad (3.1)$$

人体が吸収するエネルギーのガイドラインの指標として、SAR は全身で平均した値、1 g ないし 10 g で平均した値が用いられている [21][22]。わが国の電波防護指針においては、携帯電話端末のような局所的なばく露に対して、SAR を 10 g で平均した値をガイドラインの指標として定めている [23]。

疫学研究においては、携帯電話端末によって脳内の特定の位置に吸収されるエネルギーと脳腫瘍発生箇所の関連性の評価を 1cm³ の解像度で行うことを目標としている [9]。SAR を 10 g で平均した場合、組織によって 10 g は大きくなり得るため、特定の組織のばく露を分析することが困難となる。そのため、ばく露評価には 1 g で SAR を平均した値が好まれた [10]。疫学研究においては、脳のばく露量を評価するために、1g 平均 SAR の最大値が用いられている [5]。本論文では、脳の 1g 平均 SAR の最大値について評価した。脳の 1g 平均 SAR は、SEMCAD X の機能を用いて求めた (IEEE/IEC62704-1 に準拠)。また、本論文では脳全体でばく露量を平均した場合についても評価を行った。ここでは脳全体の平均 SAR と呼ぶ。脳全体の平均 SAR は、脳内の各セルの

SAR に脳組織の密度をかけたものを合計し、それを脳全体の質量で除すことで脳内の SAR の平均をとったものとした。算出式を以下に示す。 ρ は脳組織の密度を示している。

$$\text{脳全体の平均 SAR}[W/kg] = \frac{\int \rho \times \text{各セルの SAR}[W/kg] dv}{\int \rho dv} \quad (3.2)$$

3.3 SAR を求めるためのモデルと条件

3.3.1 基地局による SAR を求めるためのモデルと条件

基地局の波源は人体から離れていることから、大地に平行に入射する平面波と仮定した。周波数は、基地局から端末に向かう電波 (Downlink) の周波数帯を用いて計算を行った場合と簡易的に 800 MHz 帯を 800 MHz、900 MHz 帯を 900 MHz、1.5 GHz 帯を 1.5 GHz、1.8 GHz 帯を 1.8 GHz、2 GHz 帯を 2 GHz として計算を行った場合とで SAR に有意な差は見られなかったため、数値計算での周波数はそれぞれ 800 MHz、900 MHz、1.5 GHz、1.8 GHz、2 GHz とした。SAR は、電波が様々な方向から人体へ入射することを想定し、各周波数の平面波を地面と平行に前後左右斜めの計 8 方向から入射させ求めた SAR を脳内の各セルごとに平均した。さらに、電界と磁界の向きを考慮し垂直偏波と水平偏波をそれぞれ入射させ求めた SAR を平均した。求めた各周波数の SAR を、各地点における基地局のそれぞれの周波数帯における電界強度の平均値を考慮して重み付けし、脳内の各セルごとに足し合わせた。

※ 電界強度を電力密度に換算

$$\begin{aligned} & \text{9号館9階の廊下における} \\ & \text{基地局によるSAR} = \left(\begin{array}{l} \text{SAR}_{800 \text{ MHz}} \times 97 \text{ dB}\mu\text{V/m} + \text{SAR}_{900 \text{ MHz}} \times 94 \text{ dB}\mu\text{V/m} \\ + \text{SAR}_{1.5 \text{ GHz}} \times 91 \text{ dB}\mu\text{V/m} + \text{SAR}_{1.8 \text{ GHz}} \times 91 \text{ dB}\mu\text{V/m} + \text{SAR}_{2 \text{ GHz}} \times 94 \text{ dB}\mu\text{V/m} \end{array} \right) \end{aligned}$$

図 3.1 重み付けの例

以上より、基地局の SAR を推定する方法をまとめると、

- 基地局の電波は大地に平行に入射する平面波と仮定
- 周波数は、Downlink の周波数帯から 800 MHz、900 MHz、1.5 GHz、1.8 GHz、2 GHz とする
- 各周波数ごとに平面波を地面と平行に前後左右斜めの計 8 方向より入射し脳内の各セルごとに SAR を平均する
- 垂直偏波入射、水平偏波入射の場合の SAR を脳内の各セルごとに平均する
- 各周波数での SAR を各地点における基地局のそれぞれの周波数帯における電界強度の平均値を考慮して重み付けし、脳内の各セルごとに足し合わせる

となる。

計算手法は FDTD(Finite Difference Time Domain) 法を用いた。計算には SEMCAD X Ver.14.8.6 (Schmid & Partner Engineering AG) を用いた。基地局による SAR を求めるためのモデルおよび条件を図 3.2、表 3.1 に示す。モデルは解剖学的不均一人体モデルの日本人標準男性モデルの 20 歳のモデル [24] を用いた。全身モデルを計算した場合の脳の SAR との相対差が 10 % 以下となるように、肩から下を十分に含むモデルを用いた。垂直偏波入射では肩から下が平面波の半波長より十分大きいモデルとして、800 MHz、900 MHz 入射で Model1、1.5 GHz、1.8 GHz、2 GHz 入射で Model2 を用いた。水平偏波入射の場合は、垂直偏波入射の場合に比べて全身モデルとの脳の SAR の相対差は小さくなることから [25] (詳しくは付録 A を参照)、すべての周波数に対して Model2 を用いた。モデルは $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ に離散化して計算を行った。モデルを構成する各人体組織に対して、文献値 [26] の電気定数、密度を与えた。脳組織の密度を表 3.2 に示す。この脳組織の密度を用いて、脳全体の平均 SAR を求めた。計算領域は、少なくともモデル表面と計算領域の境界面との間を 40 セル以上開けるようにした。なお、モデル表面と計算領域の境界面との距離を変化させた場合の SAR の値に有意な差はないことを確認している。吸収境界条件は、計算領域の境界面で吸収される平面波は少なくとも 99 % より高い割合で吸収されるように設定した。これらの UPML の層数は SEMCAD X により自動で最適な値に設定された。基地局からの電界強度は、2 章より実環境下で得られた基地局のそれぞれの周波数帯における電界強度の平均値を用いた。

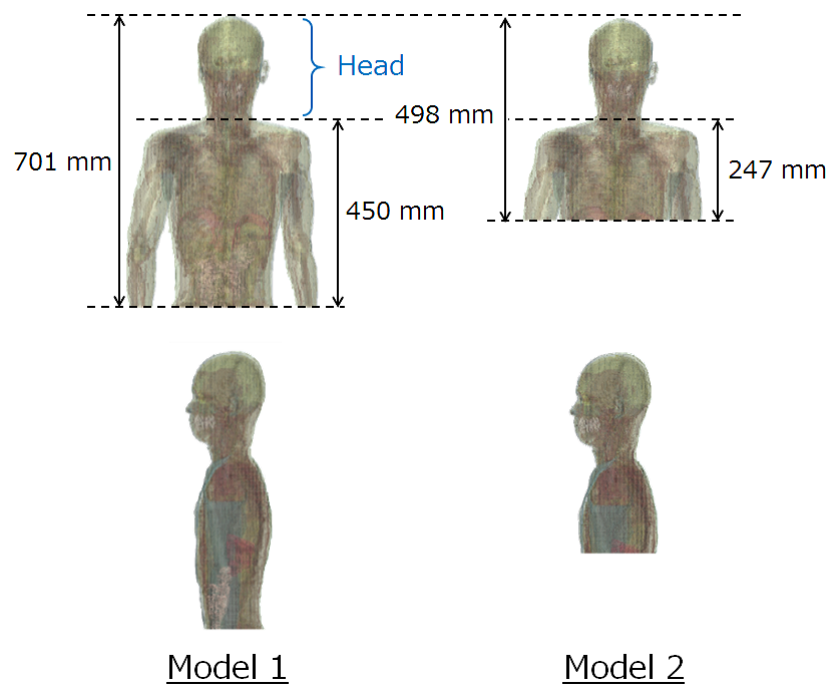


図 3.2 20 歳 Taro [24] の肩モデル

表 3.1 基地局による SAR を求めるための計算条件

セルサイズ		1 mm × 1 mm × 1 mm
周波数		800 MHz, 900 MHz, 1.5 GHz, 1.8 GHz, 2 GHz
計算領域	Model 1	644 mm × 484 mm × 864 mm
	Model 2	644 mm × 484 mm × 654 mm
吸収境界条件		UPML(800 MHz:13 層, 900MHz:12 層, 1.5 GHz:12 層, 1.8 GHz:11 層, 2 GHz:11 層)

表 3.2 脳組織の密度 [26]

脳組織	密度 [kg/m ³]
Cerebellum	1045.0
Greymatter	1044.5
Hypothalamus	1053.0
Midbrain	1045.5
Pinealgland	1053.0
Pituitarygland	1053.0
Thalamus	1044.5
Whitematter	1041.0

3.3.2 端末による SAR を求めるためのモデルと条件

端末によるばく露は、第 3 世代携帯電話端末を右手で頬の位置に持って通話を行った場合を仮定した。端末の周波数は、基地局から端末に向かう電波 (Uplink) の周波数帯のうち、SMP の対応する周波数帯から 800 MHz 帯 (815 MHz～845 MHz)、2 GHz 帯 (1920 MHz～1980 MHz) であると仮定した。数値計算では周波数を 800 MHz 帯を 835 MHz、2 GHz 帯を 1.95 GHz と仮定して SAR を求めた。

計算手法は FDTD (Finite Difference Time Domain) 法を用いた。計算には SEMCAD X Ver.14.8.6 (Schmid & Partner Engineering AG) を用いた。端末による SAR を求めるためのモデルを図 3.3、図 3.4 に示す。計算条件を表 3.3 に示す。

端末モデルにはフリップ型の代表的な第 3 世代携帯電話端末の数値モデルを用いた。この端末は、図 3.3 よりアンテナが端末中央に配置されているものである。図 3.5 に、第 3 世代以降の携帯電話端末のメーカーによって公表されている 10g 平均 SAR の最大値のヒストグラムを示す。モデルに用いた端末の実機のメーカーによって公表されている 10g 平均 SAR の最大値は 0.451 W/kg である。本論文が用いた端末は、SAR が小さいところから 23 パーセンタイル値にある端末であった。そのため図 3.5 より、10g 平均 SAR の最大値は平均値、中央値よりもやや小さいものを用いたこととなる。10g 平均 SAR の最大値がより大きい端末を基に作られたモデルを用いれば、端末による脳の SAR は本論文より求めたものよりも大きくなることが考えられる。また、アンテナの位置が端末の下端、中央、上端に位置するかでアンテナと人体脳部の距離が変化するため、脳の SAR は異なる。本論文においては、図 3.3 の端末モデルを用いた場合を端末による SAR と仮定した。

端末モデルのアンテナの入力電力は、端末のアンテナの送信電力が最大値 250 mW の時に iSAR (Schmid & Partner Engineering AG) で測定して得られた 10g 平均 SAR の最大値と数値計算上で得られる 10g 平均 SAR の最大値が同程度となるようにし、180 mW とした。図 3.6 に iSAR による SAR 測定イメージを示す。モデルは $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ に離散化して計算を行った。吸収境界条件は、計算領域の境界面で吸収される平面波は少なくとも 90 % より高い割合で吸収されるように設定した。これらの UPML の層数は SEMCAD X により自動で最適な値に設定された。なお、この計算は研究室の研究補助員の方に計算していただいた。

端末からの送信電力は、2 章より実環境下で得られた端末からの送信電力の平均値を用いた。

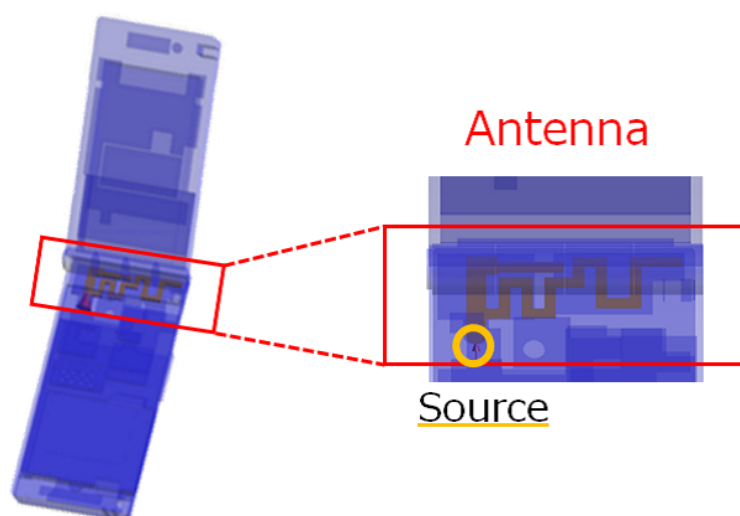


図 3.3 端末モデル

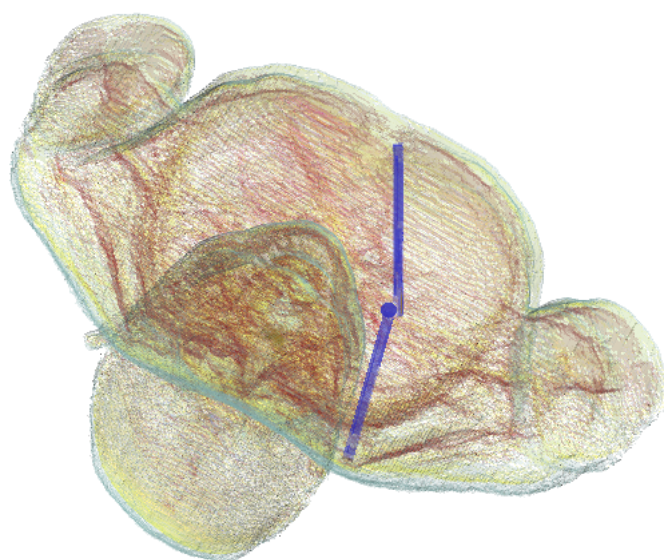


図 3.4 端末モデルの配置図 (Cheek ポジション)

表 3.3 端末による SAR を求めるための計算条件

セルサイズ	1 mm × 1 mm × 1 mm
周波数	835 MHz, 1.95 GHz
計算領域	550 mm × 470 mm × 610 mm
吸収境界条件	UPML(835 MHz:10 層, 1.95 GHz:9 層)

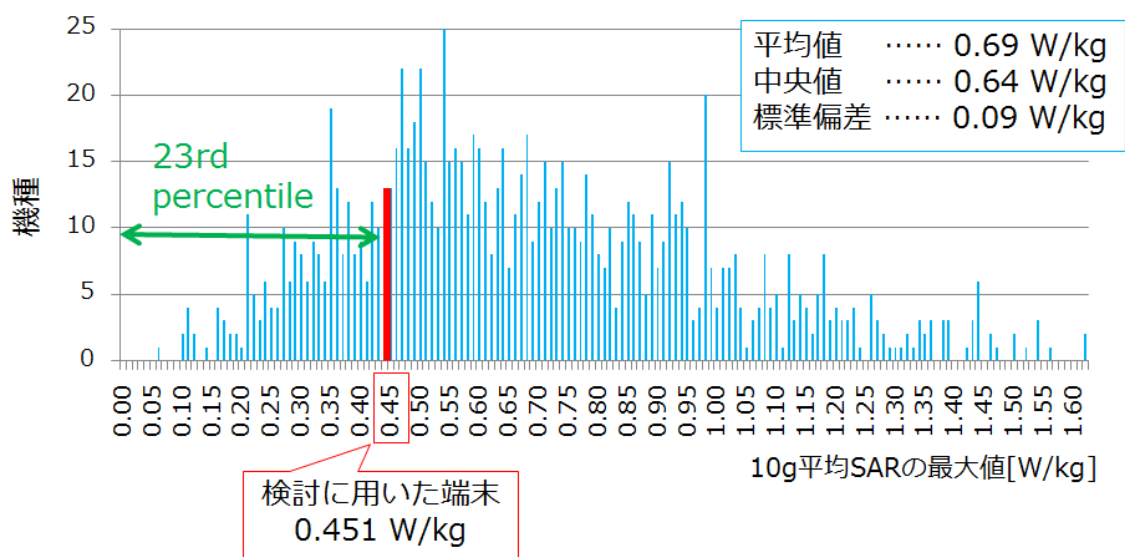


図 3.5 第 3 世代以降の携帯電話端末のメーカーによって公表されている 10g 平均 SAR の最大値

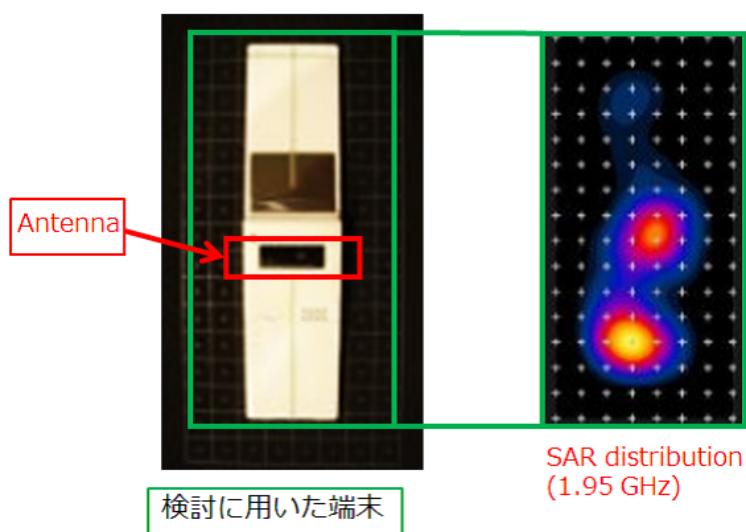


図 3.6 端末の iSAR による SAR 測定イメージ

3.4 まとめ

実環境下で得られた基地局からの電界強度および端末からの送信電力の平均値に基づき、基地局および端末による脳のばく露量を数値計算により求めた。ばく露量の評価には、脳の 1g 平均 SAR の最大値と、脳全体の平均 SAR について評価した。基地局および端末によるばく露を仮定し、モデル化した。ただし、検討に用いた人体モデルおよび端末モデルが変われば、また両者に

よる脳へのばく露の仮定が変われば、求めた SAR は異なってくることも考えられる。本論文においては、本章で用いたモデルより得られた SAR を基地局および端末によるばく露量として、ばく露評価を行う。

第 4 章

基地局および端末による脳の SAR

4.1 はじめに

実環境下で得られた基地局の電界強度および端末の送信電力の平均値に基づき、基地局および端末による脳の SAR を求めた。本章では求めた基地局および端末による脳の SAR について述べる。

4.2 ある実環境下における基地局および端末による脳の SAR

4.2.1 屋内外を含めた各場所における基地局および端末による SAR

大学構内を測定した場合における各場所における脳の 1g 平均 SAR の最大値を図 4.1、脳全体の平均 SAR を図 4.2 に示す。これらの基地局および端末による脳の SAR は、ガイドラインの値 (2 W/kg [23]) と比較すると、ガイドラインの値は 10g 平均 SAR の最大値であるため直接的な比較は出来ないが、基地局および端末による脳の 1g 平均 SAR の最大値および脳全体の平均 SAR が $\mu\text{W/kg}$ – nW/kg のオーダーであることを考えると、ガイドラインよりはるかに小さいことが示された。屋内の場合は、端末による脳の 1g 平均 SAR の最大値は基地局よりも 10 倍大きい場合があることが示された。脳全体の平均 SAR では、端末は基地局と同程度か小さいことが示された。このことから、疫学研究において端末のばく露量を評価する際に、端末使用者が端末を屋内で使用したか屋外で使用したかについても考慮する必要があると考えられる。

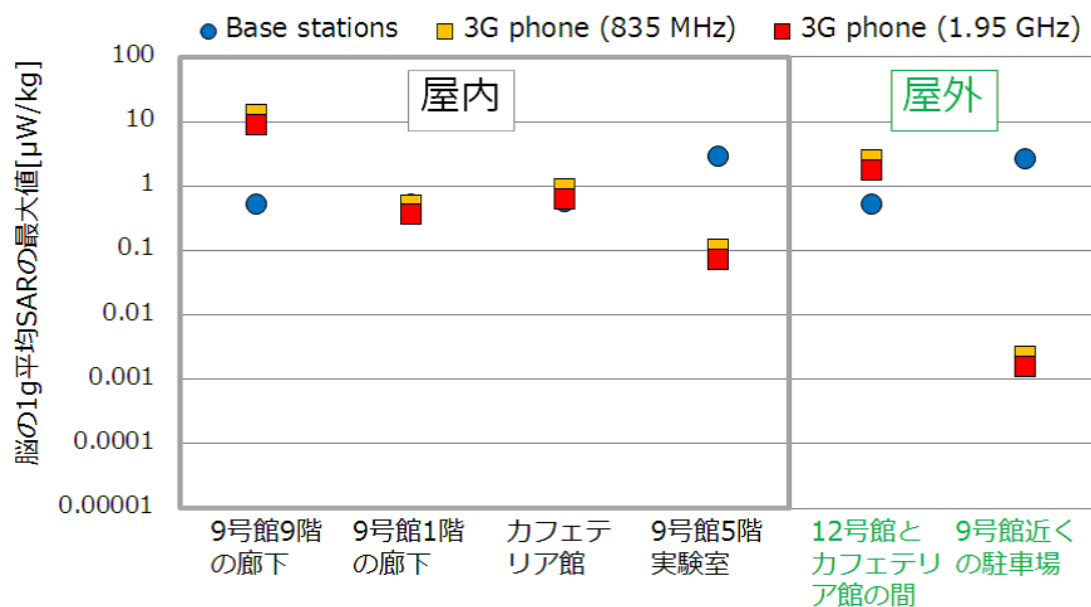


図 4.1 各場所における基地局および端末による脳の 1g 平均 SAR

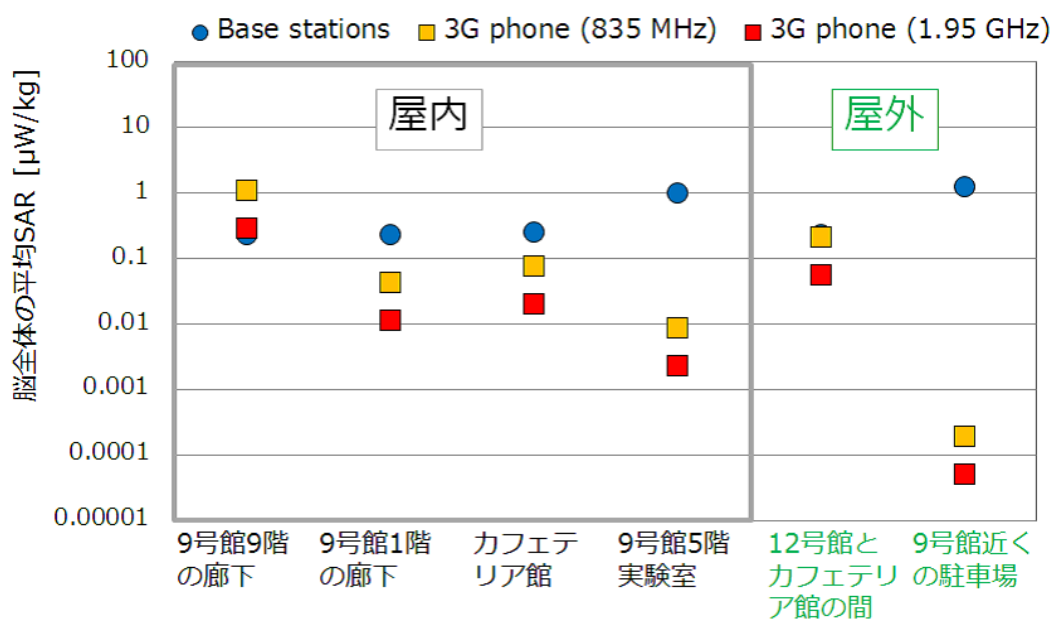


図 4.2 各場所における基地局および端末による脳全体の平均 SAR

4.2.2 各地域における基地局および端末による SAR

東京都内を車で走行し測定した場合における各地域における脳の 1g 平均 SAR の最大値を図 4.3、脳全体の平均 SAR を図 4.4 に示す。これらの SAR は、各地域において自動車内に測定機器を設置し得られた基地局の電界強度および端末の送信電力の平均値に基づいて求められたものであり、本論文ではその地域における屋外での SAR とした。これらの基地局および端末による脳 SAR は、ガイドラインの値 (2 W/kg [23]) よりもはるかに小さかった。各地域における基地局および端末による脳の 1g 平均 SAR の最大値を比較すると、屋外では端末による SAR は基地局の 0.01 – 0.1 倍であった。地域ごとにみると、基地局による SAR は市街では大きく郊外では小さいことが示された。また、端末による SAR は市街では小さく郊外では大きくなる傾向が示された。ただし、地域によっては必ずしもそうではないことも示された。脳全体の平均 SAR では、さらに端末は基地局よりも小さかった。このように基地局による SAR と端末による SAR の差は地域によって異なるため、疫学研究において端末によるばく露量を正確に評価するためには、端末使用者の周辺環境を調査することが重要であると考えられる。また、4.2.1 で屋内の場合は端末の方が基地局よりも SAR は大きくなる場合があることが示されたので、その地域においても屋内の場合は端末による SAR の方が基地局よりも大きくなる場合があることが考えられる。

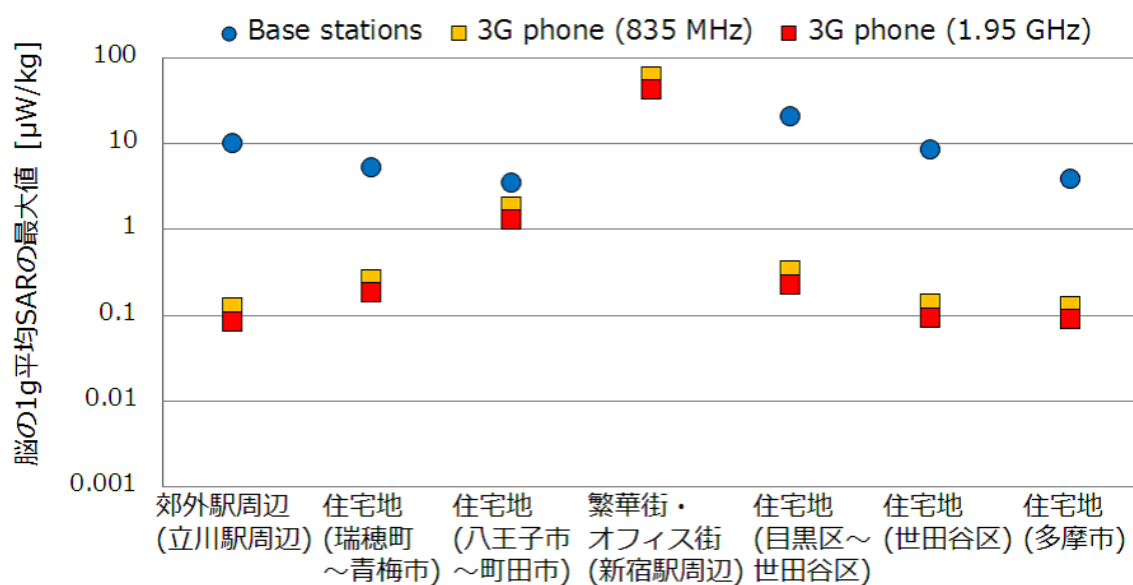


図 4.3 各地域における基地局および端末による脳の 1g 平均 SAR の最大値

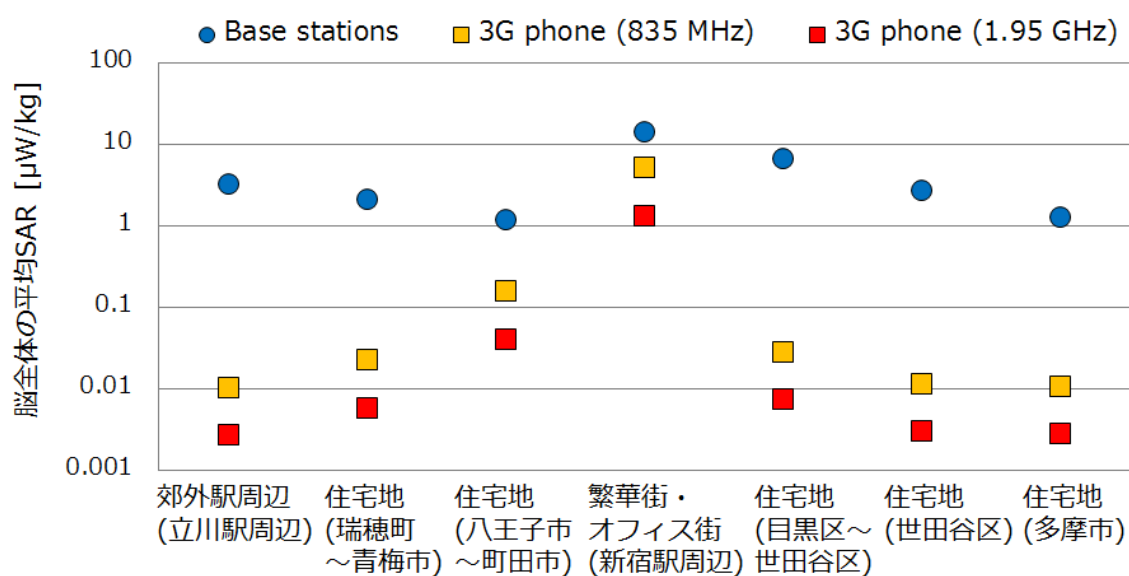


図 4.4 各地域における基地局および端末による脳全体の平均 SAR

4.3 まとめ

以上より、実環境下で得られた基地局の電界強度および端末の送信電力の平均値に基づき、基地局および端末による脳の SAR を求めた。基地局および端末による脳の SAR は、ガイドラインよりもはるかに小さいことが示された。屋外 (自動車内) では端末による SAR は基地局と同程度か小さいことが示された。地域ごとにみると、基地局による SAR は市街では大きく郊外では小さいことが示され、端末による SAR は市街では小さく郊外では大きくなる傾向が示された。ただし、地域によっては必ずしもそうではないことも示された。屋内では、端末による SAR の方が基地局よりも大きくなる場合があることが示された。そのため端末による SAR が基地局よりも小さい地域においても、屋内の場合は端末による SAR の方が大きくなる可能性も考えられる。これらのことから、基地局による SAR と端末による SAR の差は地域によって異なるため、疫学研究において端末によるばく露量を正確に評価するためには、端末使用者の周辺環境を調査することが重要であり、また屋内か屋外で端末を使用したかについても考慮する必要があると考えられる。

第 5 章

結論

本論文では携帯電話基地局および第 3 世代携帯電話端末による脳へのばく露を評価し、比較を行った。

はじめに、実環境下における携帯電話基地局からの電界強度および第 3 世代携帯電話端末からの送信電力を測定し、基地局からの電界強度および端末からの送信電力はどの程度であることを調査した。まず、基地局からの電界強度および端末からの送信電力がどの程度であるか、また屋内外でどう異なるかを確認するため、首都大学東京南大沢キャンパス構内にて測定を行った。測定機器を持ちながら大学構内の任意に選んだ 6 箇所にて 10 分間留まり測定値を記録した。実環境下での端末からの送信電力の平均値は小さい値であることを確認した。各場所における基地局からの電界強度および端末からの送信電力の平均値は場所によって様々であり、駐車場のよう電波が届きやすいような場所では基地局からの電界強度は大きく端末からの送信電力は小さい傾向が示された。次に、基地局からの電界強度および端末からの送信電力が時間経過とともにどう変化するかを確認するため、大学構内の 9 号館 5 階の実験室にて 24 時間測定を行った。基地局からの電界強度および端末からの送信電力の 24 時間の推移を確認すると、電界強度の時間変化は周波数帯によるがおよそ 0 - 3 dB ほどであった。送信電力は 0 dBm 以上はわずかであり、おおむね -45 - -20 dBm で推移していた。次に、測定地域による基地局からの電界強度および端末からの送信電力の違いを調査するため、東京都内の郊外駅周辺、繁華街、住宅地などの様々な地域を車で走行しながら測定を行った。測定は測定機器を車内に設置し行った。この測定より得られた基地局からの電界強度および端末からの送信電力は屋外の場合の値であるとした。任意に選択した地域 7 箇所を対象とし、各地域における基地局からの電界強度および端末からの送信電力の平均値を求めた。基地局からの電界強度は繁華街などのほうが住宅地よりも大きく、端末からの送信電力は住宅地の方が繁華街などよりも大きい傾向を示した。ただし、測定地域によって必ずしもそうとはいえないことも示された。

続いて、実環境下で得られた基地局からの電界強度および端末からの送信電力の平均値に基づき、基地局および端末による脳へのばく露量を数値計算により推定した。ばく露量の評価には、

SAR(Specific Absorption Rate, 比吸収率 [W/kg]) を用いた。脳の 1g 平均 SAR の最大値と脳全体の平均 SAR について評価した。モデルは解剖学的不均一人体モデルおよびフリップ型の代表的な第 3 世代携帯電話端末の数値モデルを用いた。

最後に、求めた基地局および端末による脳の SAR を求めたところ、ガイドラインよりもはるかに小さいことが示された。本論文で測定した実環境下においては、また場所によって位置外にいないが、両者の SAR を比較すると、屋外 (自動車内) の場合は端末は基地局と同程度か小さく、屋内の場合は端末の方が大きい場合があることが示された。

このことから、主に端末の累積通話時間に着目して端末による脳のばく露量を評価する従来の疫学研究の方法では正確なばく露評価は困難であり、端末によるばく露と疾病の関連性を調べるためには、端末使用者の周辺環境の調査や、屋内か屋外で使用したかについても考慮するなど、より精密なばく露評価が必要であることを明らかにした。

本論文では携帯電話端末以外によるばく露として、携帯電話基地局の電波によるばく露に着目したが、他にも無線 LAN などの電波によるばく露を検討する必要があることが考えられる。また、携帯電話端末についても、LTE や 4G など新しい通信方式を用いた端末の検討も行う必要があると考えられる。

参 考 文 献

- [1] Michael H. Repacholi, "Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields:health effects and research needs", *Bioelectromagnetics*, Vol.19, pp.1-19, 1998.
- [2] The INTERPHONE Study Group, "Brain tumor risk in relation to mobile telephone use: result of the INTERPHONE international case-control study", *International Journal of Epidemiology*, vol.39, No.3, pp.675-694, 2010.
- [3] T. Takebayashi, *et al.*, "Mobile phone use, exposure to radiofrequency electromagnetic field, and brain tumour: a case-control study", *British Journal of Cancer.*, Vol.98, pp.652-659, 2008.
- [4] N. Gaudin, "IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans", International Agency for Research on Cancer, press release No.208, 2011.
- [5] A. Ghanmi, *et al.*, "Analysis of the influence of handset phone position on RF exposure of brain tissue", *Bioelectromagnetics.*, Vol.35, No.8, pp.568-579, 2014.
- [6] S. Sadetzki, *et al.*, "The MOBI-Kids study protocol: challenges in assessing childhood and adolescent exposure to electromagnetic fields from wireless telecommunication technologies and possible association with brain tumor risk", *Frontiers in public health*, Vol.2, pp.1-10, 2014.
- [7] S. Lonn, *et al.*, "Mobile phone use and the risk of acoustic neuroma", *Epidemiology.*, Vol.15, No.6, pp.653-659, 2004.
- [8] E. Cardis, *et al.*, "Estimation of RF energy absorbed in the brain from mobile phones in the Interphone Study", *Occup. Environ. Med.*, Vol. 68, pp.686-693, 2011.
- [9] E. Cardis, *et al.*, "Distribution of RF energy emitted by mobile phones in anatomical structures of the brain", *Phys. Med. Biol.*, Vol. 53, No.11, pp.2771-2783, 2008.

- [10] J. Wiart, *et al.*, "Analysis of RF exposure in the head tissues of children and adults", *Phys. Med. Biol.*, Vol. 53, No.13, pp.3681-3695, 2008.
- [11] K. Wake, *et al.*, "The estimation of 3D SAR distributions in the human head from mobile phone compliance testing data for epidemiological studies", *Phys. Med. Biol.*, Vol. 54, No.19, pp.5695-5706, 2009.
- [12] A. Gati, *et al.*, "Exposure Induced by WCDMA Mobiles Phones in Operating Networks", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.8, No.12, pp.5723-5727, 2009.
- [13] 総務省, "携帯電話基地局周辺の電界強度測定等の調査報告書", 平成 18 年 2 月.
- [14] 総務省, "我が国の電波の使用状況", H27 年 5 月.
- [15] "SRM-3006 簡易取扱説明書", 東洋メディック株式会社, 2010 年 1 月.
- [16] Jack T. Rowley, *et al.*, "Comparative international analysis of radiofrequency exposure surveys of mobile communication radio base stations", *J Expo Sci Environ Epidemiol*, vol.22, no.3, pp.304-315, 2012.
- [17] 総務省, "携帯電話基地局周辺の電界強度測定方法に関する調査", 平成 20 年 3 月.
- [18] K. Kiyohara, *et al.* "Recall accuracy of mobile phone calls among Japanese young people", *J Expo Sci Environ Epidemiol*, pp.1-9, 18 Mar. 2015.
- [19] 環境省 自然環境局, "自然環境保全基礎調査", [http : //www.biodic.go.jp/kiso/colmesh.html](http://www.biodic.go.jp/kiso/colmesh.html), 参照 Aug. 30, 2016.
- [20] 政府統計の総合窓口 (e-Stat), "地図でみる統計 (統計 GIS)", <http://www.e-stat.go.jp /SG1 /estat /toukeiChiri.do?method=init>, 参照 Nov. 11, 2016.
- [21] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", *Health Phys*, Vol.74, No.4, pp.494-522, 1998.
- [22] IEEE, "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz", IEEE Standard C95.1, 2005.
- [23] 総務省, "電波防護指針諮問第 89 号「電波利用における人体防護の在り方」", 1997 年 4 月.
- [24] 長岡智明, 他, "ボリュームモーフィング手法による日本人の標準頭部モデル開発", 信学技報, EMCJ2014-15, Jun. 2014.

- [25] 新沼友望, 他, "全身および頭部モデルに対する平面波ばく露による脳内 SAR の検討", 2015 信学ソ大 (通信), No.B-4-4, 2015.
- [26] IT'IS Foundation, "TISSUE PROPERTIES Database Summary", <http://www.itis.ethz.ch/virtual-population/tissue-properties/database/database-summary/>, 参照 Dec.16, 2015.
- [27] B. B. Beard, *et al.*, "Comparisons of computed mobile phone induced SAR in the SAM phantom to that in anatomically correct models of the human head", *IEEE Trans. electromagnetic compatibility*, Vol.48, No.2, pp.397-407, 2006.
- [28] J. Wang, *et al.*, "Computation with a parallel FDTD system of human-body effect on electromagnetic absorption for portable telephones", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.52, No.1, pp.53-58, 2004.
- [29] T. Nagaoka, *et al.*, "Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry", *Phys. Med. Biol.*, Vol.49, No.1, pp.1-15, 2004.

付録 A

全身および頭部モデルに対する平面波ばく露による脳の SAR の検討

A.1 はじめに

携帯電話端末の使用と脳腫瘍との関連性を対象とした疫学研究では、携帯電話端末のアンテナから発生する高周波電磁界から受ける局所的なばく露を考え、頭部のみのモデルを用いた検討が行われてきた [27]。頭部モデルと胴体を含むモデルとの脳内の SAR の相違は、最大で 10 % 程度であることが確認されている [28]。しかし、遠方界ばく露については肩の反射によって脳内 SAR の相違がより顕著になるという懸念があるものの、その定量的な評価は十分に行われていない。本研究では平面波を用いた遠方界ばく露について、肩の有無による脳の 1g 平均 SAR を比較した。

A.2 検討方法

A.2.1 検討に用いる人体モデル

モデルを図 A.1 に示す。計算条件を表 A.1 に示す。モデルは、日本人成人男性を模擬した全身モデル (TARO) [29] を用いた。セルサイズは $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ である。全身モデルから肩より上を取り出したモデル (以下、肩上モデル) と頭部のみを取り出したモデル (以下、頭部モデル) をそれぞれ用いて計算し、全身モデルを用いた場合との脳の 1g 平均 SAR の相対差を求めた。平面波の周波数は 2 GHz とした。平面波を前後左右の 4 方向および斜め上から入射させ全身モデルとの相対差を求めた。計算手法は FDTD (Finite Difference Time Domain) 法を用いた。計算には SEMCAD X (Schmid & Partner Engineering AG) を用いた。吸収境界条件は、計算領域の境界面で吸収される平面波は少なくとも 99 % より高い割合で吸収されるように設定した。UPML の層数は SEMCAD X により自動で最適な値に設定された。相対差は、SEMCAD X の機能を用いて求めた、脳内の各セルを中心とした 1g 平均 SAR の値を用いて算出した。相対差は以下の式で導出した。各セルでの 1g 平均 SAR の大きさに応じた相対差を確認した。

各モデルと全身モデルとの相対差 [%]

$$= \frac{\text{各モデルの脳の } 1g \text{ 平均 } SAR - \text{全身モデルの脳の } 1g \text{ 平均 } SAR}{\text{全身モデルの脳の } 1g \text{ 平均 } SAR} \times 100 \quad (\text{A.1})$$

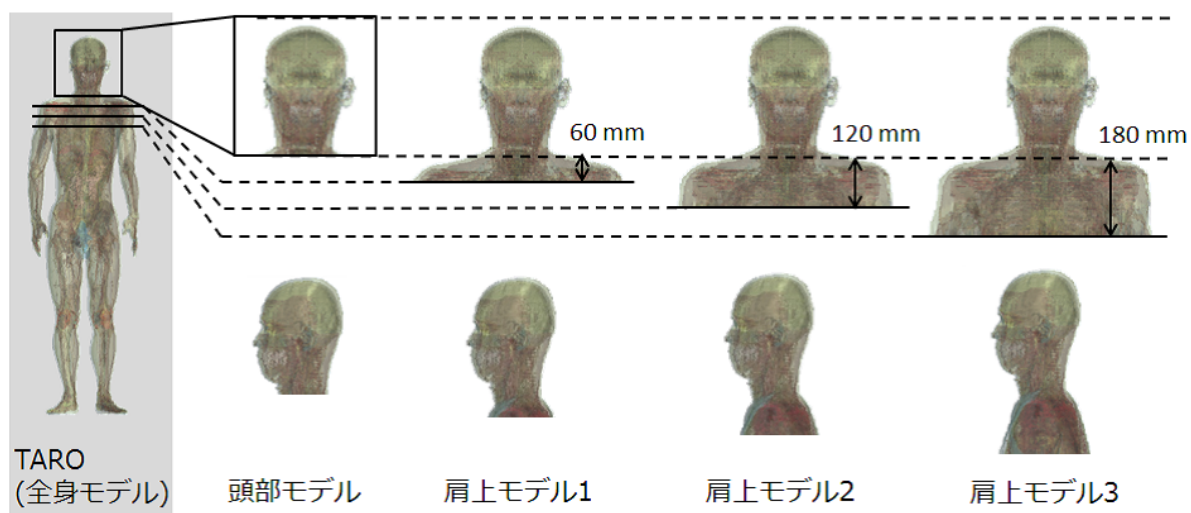


図 A.1 計算モデル (TARO モデル)

表 A.1 計算条件

平面波 (垂直偏波・水平偏波)	周波数	2 GHz
	電力密度	100 W/m ²
セルサイズ		2 mm × 2 mm × 2 mm
計算領域	全身モデル [29]	744 mm × 484 mm × 1844 mm
	頭部モデル	544 × 484 mm × 440 mm
	肩上モデル 1	544 × 484 mm × 504 mm
	肩上モデル 2	544 × 484 mm × 504 mm
	肩上モデル 3	584 mm × 484 mm × 564 mm
吸収境界条件		UPML(10 層)

A.3 頭部および肩モデルと全身モデルとの SAR の相対差

垂直偏波および水平偏波を人体の正面から入射させた場合の脳の 1g 平均 SAR における、頭部および肩モデルと全身モデルとの相対差を図 A.2 に示す。SAR の値が大きいところに注目したときの脳の 1g 平均 SAR における各モデルと全身モデルとの相対差を表 A.2 に示す。垂直偏波入射の場合において、頭部モデルを用いて計算した場合は、全身モデルとの相対差は SAR の大きいところで -20 ～ -30 % と、過小評価となっていることがわかった。頭部の下に肩が 60 mm 含まれる肩モデル 1 の場合は全身モデルとの相対差は -20 % であった。一方、頭部の下に肩が 120 mm 含まれる肩モデル 2 の場合では全身モデルとの相対差は $\pm 10\%$ 、180 mm 含まれる肩モデル 3 の場合では 5 % 程度と小さい値であった。水平偏波入射の場合では、全身モデルとの相対差は同じモデルに垂直偏波を入射させた場合に比べて 5 分の 1 から 2 分の 1 と小さかった。このことから、頭部の下に含まれる肩が入射する平面波の半波長より十分大きければ、全身モデルとの相対差は 10 % 以内となることが示された。なお、平面波を他の方向から入射させた場合についても同様の結果が得られた。

垂直偏波と水平偏波で相対差に違いが見られた理由について考える。垂直偏波の場合は、電界に平行なモデル長が波長と同程度で、モデルによって異なる。このため、各モデルに対する電流分布が異なり、脳内の電界分布も変化することで SAR の相対差も変動がみられたのではないかと考えられる (図 A.3)。水平偏波の場合は、肩モデルの肩の範囲に関わらず、脳内の電流分布の変動は少ないため SAR の相対差の変動も少ないのではないかと考えられる (図 A.3)。

以上より、基地局からのばく露を評価する際、特に垂直偏波入射の場合には頭部モデルではなく肩から下が十分含まれるモデルを用いる必要があることが示された。

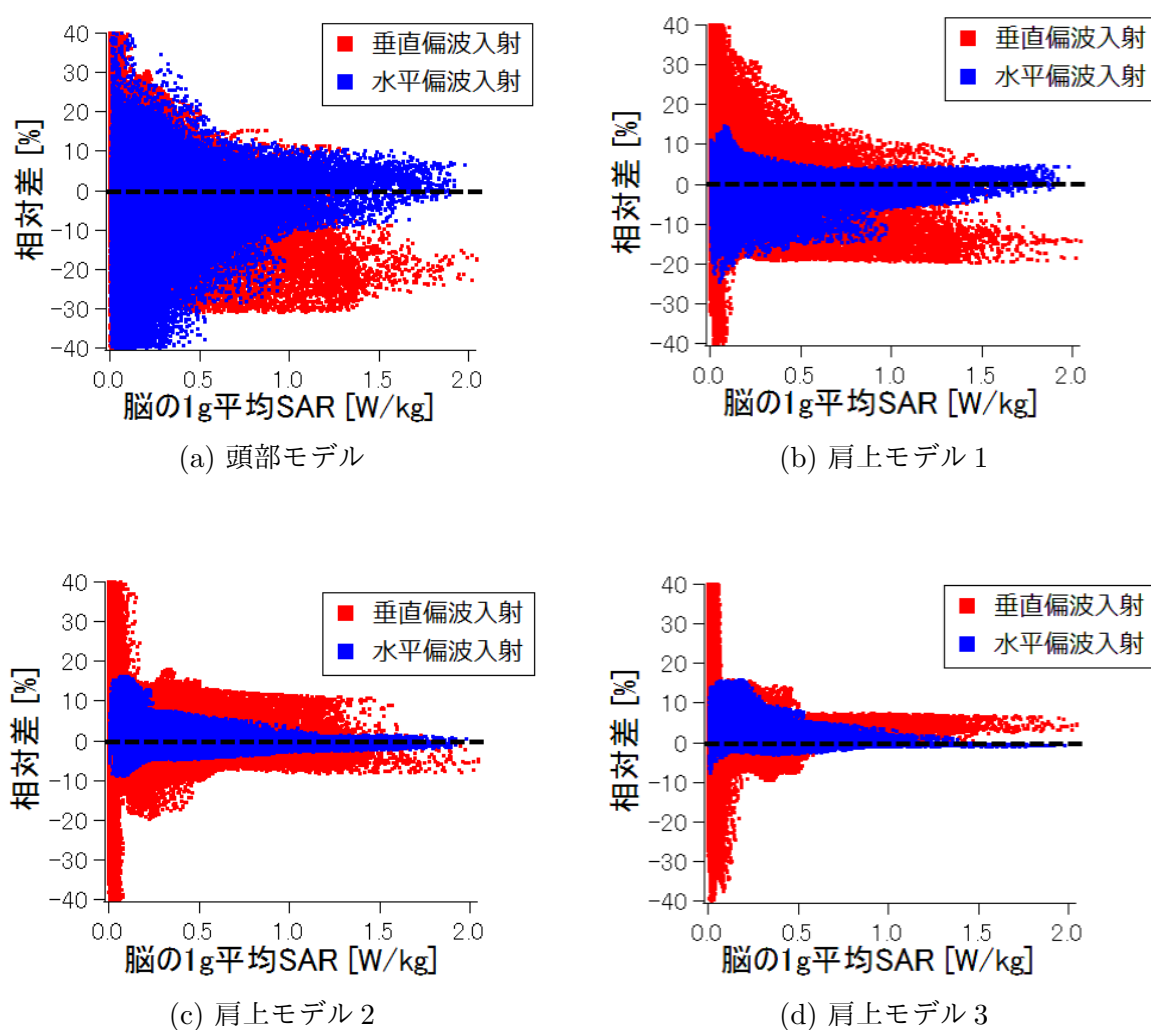


図 A.2 平面波正面方向入射時の脳の 1g 平均 SAR における全身モデルとの相対差

表 A.2 SAR の値が大きいところに注目したときの脳の 1g 平均 SAR における各モデルと全身モデルとの相対差

	垂直偏波入射	水平偏波入射
頭部モデル	-20 ～ -30 %	± 10 %
肩モデル 1	-20 %	+ 5 %
肩モデル 2	± 10 %	± 2 %
肩モデル 3	+ 5 %	± 1 %未満

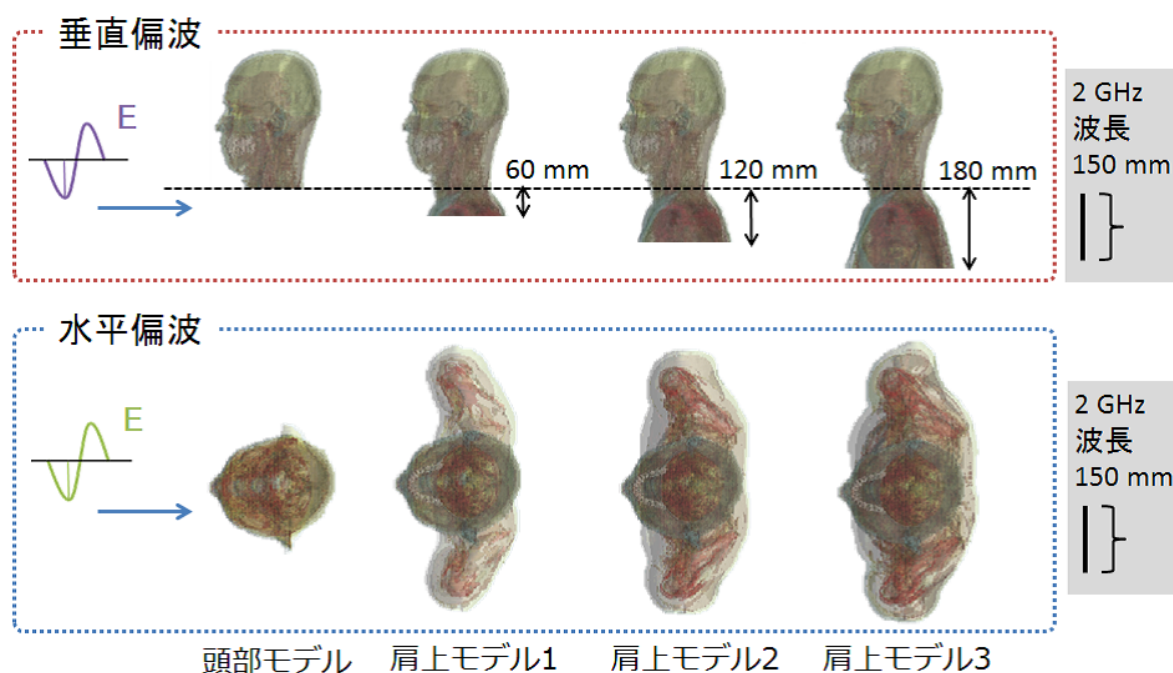


図 A.3 垂直偏波・水平偏波入射の相対差の差異の考察

A.4 まとめ

平面波を用いた遠方界ばく露について、肩の有無による脳の 1g 平均 SAR を比較した。頭部および肩上モデルと全身モデルとの脳の 1g 平均 SAR の相対差を求めた。垂直偏波・人体の正面方向入射時において、頭部モデルを用いて計算した場合は、全身モデルとの相対差は SAR の大きいところで -20 ～ -30 % と、過小評価となっていることがわかった。一方、頭部の下に含まれる肩が入射する平面波の半波長より十分大きければ、全身モデルとの相対差は 10 % 以内となることが示された。水平偏波入射の場合では、全身モデルとの相対差は同じモデルに垂直偏波を入射させた場合と比べて 5 分の 1 から 2 分の 1 と小さかった。このことから、基地局からのばく露を評価する際、特に垂直偏波入射の場合には頭部モデルではなく肩から下が十分含まれるモデルを用いる必要があることが示された。

付録 B

小児モデルを用いた場合との比較

B.1 はじめに

本論文は人体モデルに 20 歳モデル (成人) を用いている。一方、小児の場合は頭部が成人に比べて小さく、形状も成人とは異なること、さらに小児の頭蓋骨が成人に比べて薄いなど、組織構造が異なる。ここでは、2 章より得られた、9 号館 9 階の廊下における基地局および端末による脳の 1g 平均 SAR の最大値および脳全体の平均 SAR を、小児と成人の場合で比較した。

B.2 モデルと条件

B.2.1 基地局による SAR を求めるためのモデルと条件

基地局の SAR を推定する方法は 3.3.1 より、

- 基地局の電波は大地に平行に入射する平面波と仮定
- 周波数は、Downlink の周波数帯から 800 MHz、900 MHz、1.5 GHz、1.8 GHz、2 GHz とする
- 各周波数ごとに平面波を地面と平行に前後左右斜めの計 8 方向より入射し脳内の各セルごとに SAR を平均する
- 垂直偏波入射、水平偏波入射の場合の SAR を脳内の各セルごとに平均する
- 各周波数での SAR を 9 号館 9 階の廊下における基地局のそれぞれの周波数帯における電界強度の平均値を考慮して重み付けし、脳内の各セルごとに足し合わせる

とした。

モデルを図 B.1、図 B.2 に示す。解剖学的不均一人体モデルの日本人標準男性モデルの、小児モデルとして 7 歳モデル (図 B.1)、成人モデルとして 20 歳モデル (図 B.2) を用いた [24]。

計算手法はFDTD(Finite Difference Time Domain)法を用いた。計算にはSEMCAD X Ver.14.8.6 (Schmid & Partner Engineering AG)を用いた。全身モデルを計算した場合の脳のSARとの相対差が10 %以下となるように、肩から下を十分に含むモデルを用いた。垂直偏波入射では肩から下が平面波の半波長より十分大きいモデルとして、800 MHz、900 MHz 入射で Model1、1.5 GHz、1.8 GHz、2 GHz 入射で Model2 を用いた。水平偏波入射の場合は、垂直偏波入射の場合に比べて全身モデルとの脳のSARの相対差は小さくなることから [25] (詳しくは付録 A を参照)、すべての周波数に対して Model2 を用いた。モデルは $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ に離散化して計算を行った。モデルを構成する各人体組織に対して、文献値 [26] の電気定数、密度を与えた。計算領域は、少なくともモデル表面と計算領域の境界面との間を 40 セル以上開けるようにした。なお、モデル表面と計算領域の境界面との距離を変化させた場合の SAR の値に有意な差はないことを確認している。吸収境界条件は、計算領域の境界面で吸収される平面波は少なくとも 99 %より高い割合で吸収されるように設定した。これらの UPML の層数は SEMCAD X により自動で最適な値に設定された。計算条件を表 B.1、表 B.2 に示す。

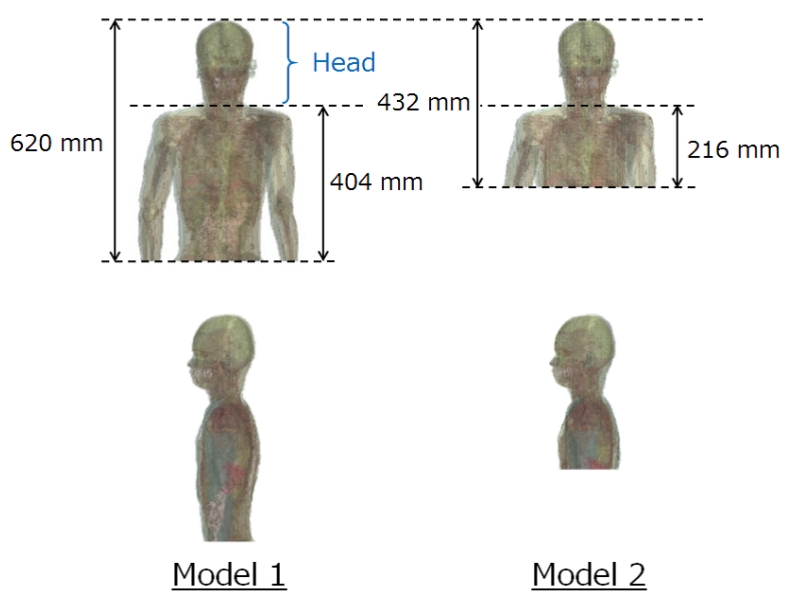


図 B.1 7歳 Taro [24] の肩上モデル

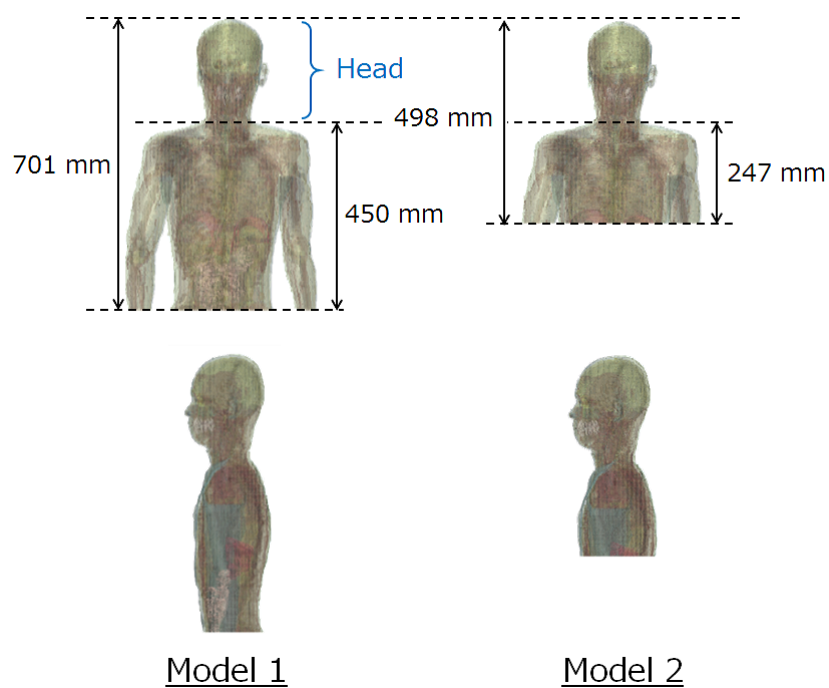


図 B.2 20歳 Taro [24] の肩上モデル

表 B.1 基地局による SAR を求めるための 7 歳モデルの計算条件

セルサイズ	1 mm × 1 mm × 1 mm	
周波数	800 MHz, 900 MHz, 1.5 GHz, 1.8 GHz, 2 GHz	
計算領域	Model 1	574 mm × 364 mm × 744 mm
	Model 2	574 mm × 364 mm × 574 mm
吸収境界条件	UPML(800 MHz:13 層, 900MHz:12 層, 1.5 GHz:12 層, 1.8 GHz:11 層, 2 GHz:11 層)	

表 B.2 基地局による SAR を求めるための 20 歳モデルの計算条件

セルサイズ	1 mm × 1 mm × 1 mm	
周波数	800 MHz, 900 MHz, 1.5 GHz, 1.8 GHz, 2 GHz	
計算領域	Model 1	644 mm × 484 mm × 864 mm
	Model 2	644 mm × 484 mm × 654 mm
吸収境界条件	UPML(800 MHz:13 層, 900MHz:12 層, 1.5 GHz:12 層, 1.8 GHz:11 層, 2 GHz:11 層)	

B.2.2 端末による SAR を求めるためのモデルと条件

端末の SAR は、第 3 世代携帯電話端末を右手で頬の位置に持って通話を行った場合を仮定した。端末の周波数は、基地局から端末に向かう電波 (Uplink) の周波数帯のうち、SMP の対応する周波数帯から 800 MHz 帯 (815 MHz～845 MHz)、2 GHz 帯 (1920 MHz～1980 MHz) であると仮定した。数値計算では周波数を 800 MHz 帯を 835 MHz、2 GHz 帯を 1.95 GHz と仮定して SAR を求めた。

計算手法は FDTD (Finite Difference Time Domain) 法を用いた。計算には SEMCAD X Ver.14.8.6 (Schmid & Partner Engineering AG) を用いた。端末モデルにはフリップ型の代表的な第 3 世代携帯電話端末の数値モデルを用いた。この端末は、図 3.3 よりアンテナが端末中央に配置されているものである。

端末モデルのアンテナの入力電力は、端末のアンテナの送信電力が最大値 250 mW の時に iSAR (Schmid & Partner Engineering AG) で測定して得られた 10g 平均 SAR の最大値と数値計算上で得られる 10g 平均 SAR の最大値が同程度となるようにし、180 mW とした。モデルは $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ に離散化して計算を行った。吸収境界条件は、計算領域の境界面で吸収される平面波は少なくとも 90 % より高い割合で吸収されるように設定した。これらの UPML の層数は SEMCAD X により自動で最適な値に設定された。計算条件を表 B.3、表 B.4 に示す。なお、この計算は研究室の研究補助員の方に計算していただいた。

表 B.3 端末による SAR を求めるための 7 歳モデルの計算条件

セルサイズ	1 mm × 1 mm × 1 mm
周波数	835 MHz, 1.95 GHz
計算領域	455 mm × 370 mm × 530 mm
吸収境界条件	UPML(835 MHz:10 層, 1.95 GHz:9 層)

表 B.4 端末による SAR を求めるための 20 歳モデルの計算条件

セルサイズ	1 mm × 1 mm × 1 mm
周波数	835 MHz, 1.95 GHz
計算領域	550 mm × 470 mm × 610 mm
吸収境界条件	UPML(835 MHz:10 層, 1.95 GHz:9 層)

B.3 成人モデルとの比較

大学構内を測定した場合における 9 号館 9 階の廊下での脳の 1g 平均 SAR の最大値を表 B.5、脳全体の平均 SAR を表 B.6 に示す。これらの基地局および端末による脳の SAR は、ガイドラインの値 (2.0 W/kg) の 10000 分の 1 以下であった。小児と成人に対する SAR を比較すると、2 GHz 帯を用いた場合の端末による SAR においては小児の SAR は成人の 2 倍ほどであった。基地局による SAR は、端末よりも小児および端末による SAR の差は小さく同程度であった。

表 B.5 9 号館 9 階の廊下における基地局および端末による脳の 1g 平均 SAR の最大値

	基地局	端末	
		835 MHz	1.95 GHz
小児 (7 歳)	0.56 μ W/kg	15 μ W/kg	19 μ W/kg
成人 (20 歳)	0.53 μ W/kg	13 μ W/kg	9.0 μ W/kg

表 B.6 9 号館 9 階の廊下における基地局および端末による脳全体の平均 SAR

	基地局	端末	
		835 MHz	1.95 GHz
小児 (7 歳)	0.26 μ W/kg	1.5 μ W/kg	0.75 μ W/kg
成人 (20 歳)	0.24 μ W/kg	1.1 μ W/kg	0.29 μ W/kg

B.4 まとめ

脳の 1g 平均 SAR の最大値および脳全体の平均 SAR を、小児と成人の場合で比較した。例として、9 号館 9 階の廊下における基地局および端末による SAR を小児と成人の場合で比較した。小児と成人に対する SAR を比較すると、2 GHz 帯を用いた場合の端末による SAR においては小児の SAR は成人の 2 倍ほどであった。基地局による SAR は、端末よりも小児および端末による SAR の差は小さく同程度であった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、日頃から研究方針や方法、資料作成や発表について、数多くの御指導や御指摘、御助言を熱心にして下さいました多氣 昌生教授に心より感謝致します。御忙しい中でも研究や資料作成などでご相談する時間を設けて頂き、その度に熱心に御指導や御助言をして下さり、大変お世話になりました。また、測定で車の運転や深夜帯での測定に対しても多大なる御指導、御助言、御協力を下さり誠に感謝しております。実環境下においての基地局からの電界強度および端末からの送信電力という貴重なデータを得ることができ大変嬉しく思います。本研究での進捗状況報告や数値計算について、多くの御指導、御指摘を下さいました鈴木 敬久准教授に深く感謝致します。数値計算に通じた鋭い着眼点をもって御指摘を下さり、数値計算についてより深い理解を得ることができたと思っております。また、進捗状況報告について様々な御意見や御助言をして下さいました上條 敏生助教、KIK Alfred 助教に感謝致します。

数値モデルの提供のご協力を下さいました情報通信研究機構の長岡 智明 様に深くお礼を申し上げます。年齢別の人体モデルの肩から下を十分含むモデルを作成頂いたことで、全身モデルとのSARの相対差を考慮した検討を行うことができとても感謝しております。また、測定の立ち合いや御協力並びに研究に対する御助言を下さいました情報通信研究機構の和氣 加奈子 様に深く感謝いたします。また、論文の情報提供や研究への御助言をして頂きました情報通信研究機構の渡辺 聡一 様に感謝致します。

本研究において、端末によるSARの推定のための数値解析を担当下さり、端末によるSARを評価し基地局によるSARと比較するためのデータを提供下さいました、電磁環境工学研究室 研究補助員の幾代 美和 様に心より感謝致します。また、測定結果のデータ処理のためのプログラム作成に御協力下さいました研究補助員の江崎 かおる 様に心より感謝致します。基地局の膨大なデータをスムーズに解析することができ大変嬉しく思います。また、測定データ処理に御協力下さいました宮田 智子 様に感謝いたします。

疫学研究グループの先輩として、研究のご助言やご指摘、また数値解析や解析方法の指導を下さいました市川 弘樹 氏に感謝いたします。測定のお手伝いや測定データの解析のご協力をしていただきました萩原 真輝 氏に感謝致します。急な測定の協力のお願いや測定データの保存についても協力頂き大変助かりました。研究室などでの意見交換や、測定のお手伝いのご協力をしていただきました黒崎 聡太 氏、岩田 岳大 氏に感謝いたします。

3年間ともに電磁環境研究室を過ごし、研究の助言や意見交換を行ってきました、森 智亮 氏、吉野 創 氏、今井 稜 氏に感謝いたします。一人で行き詰ってしまうような時も、休憩時など雑談や意見交換を行うことで乗り越えられたように思います。

最後に、日頃から研究についての御助言や発表練習、資料の作成など多くのことに御協力、御助言をして下さいました電磁環境工学研究室の皆様に感謝致します。

本研究に関する研究業績

国内学会

- 新沼友望, 多氣昌生, 幾代美和, 長岡智明, 和氣加奈子, 渡辺聡一, ”全身および頭部モデルに対する平面波ばく露による脳内 SAR の検討”, 2015 信学ソ大 (通信), no.B-4-4, 2015.
- 新沼友望, 多氣昌生, 幾代美和, 長岡智明, 和氣加奈子, ”携帯電話基地局の電波による遠方界ばく露の評価および第 3 世代携帯電話端末によるばく露との比較”, 信学技報, EMCJ2015-112, Jan. 2016.

国際学会

- Yumi Niinuma, Masao Taki, Miwa Ikuyo, Kaoru Esaki, Masaki Hagiwara, Tomoaki Nagaoka, and Kanako Wake, ”Evaluation of Exposure from Mobile Phone Base Stations and Comparison with the Exposure from a Third Generation Mobile Phone”, 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, Aug. 21-25, Seoul, Korea, 2p, 2016.